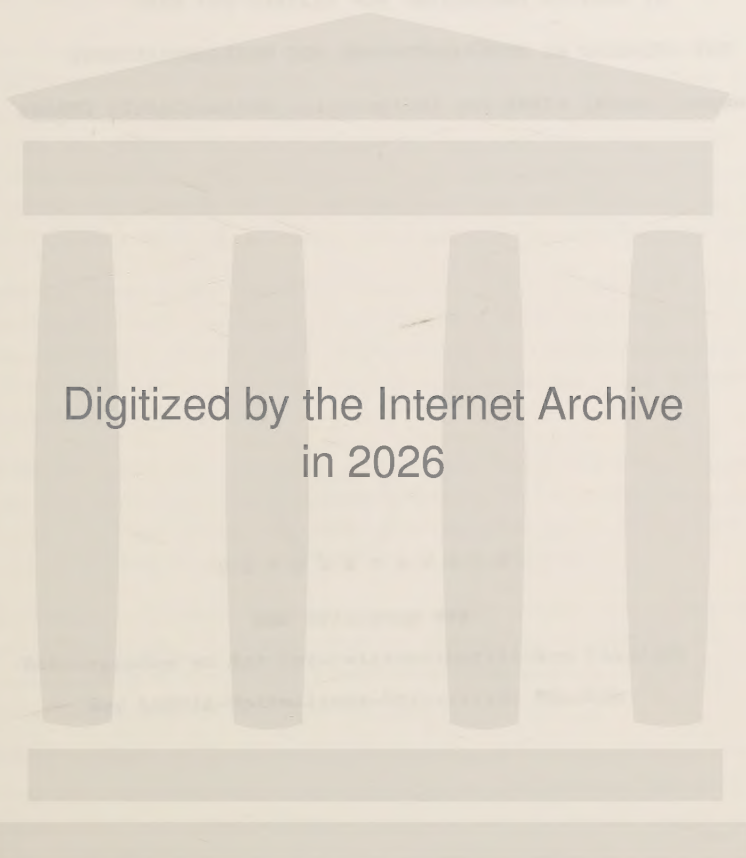


**ÜBER DEN EINSATZ VON TROPISCHEN HÖLZERN
IM INGENIEURHOLZBAU DER URSPRUNGLÄNDER
AM BEISPIEL VON ABACHI (*Triplochiton scleroxylon*)
und KHAYA (*Khaya ivorensis*)**

Augustus Gyan Addae-Mensah

1978



Digitized by the Internet Archive
in 2026

ÜBER DEN EINSATZ VON TROPISCHEN HÖLZERN IM
INGENIEURHOLZBAU DER URSPRUNGLÄNDER AM BEISPIEL VON
ABACHI (*Triplochiton scleroxylon*) und KHAYA (*Khaya ivorensis*)

DISSERTATION

zur Erlangung des
Doktorgrades an der forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Augustus Gyan Addae-Mensah
aus Ghana



1. Berichterstatter: Prof.Dr. H.Schulz
2. Berichterstatter: Prof.Dr. A.Schneider
3. Berichterstatter: Prof.Dr.-Ing. B.Heimeshoff

Tag der Promotion: 26. Juli 1978

DISSERTATIONS- UND FOTODRUCK FRANK oHG
8 München 2, Gabelsbergerstraße 15, Tel. 2 8 0 9 0 9 0

I
V O R W O R T

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Holzforschung der Universität München. Entscheidend für deren Durchführung war der in meiner Heimat Ghana überdurchschnittlich große Holzbestand, welcher infolge nicht vorhandener Eignungstests für die heimische Bauindustrie fast ungenutzt ist.

Dem Vorstand des Instituts, Herrn Prof.Dr.H.Schulz, danke ich herzlich für die Anregungen, die Probleme für den Einsatz tropischer Hölzer im Bauwesen zu untersuchen und zu versuchen, diese in den Rahmen der bisherigen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Baukonstruktion einzubeziehen. Für die Möglichkeit der Durchführung der Arbeit an seinem Institut und für die ständige Unterstützung bedanke ich mich ebenfalls bei Herrn Prof.Dr.Schulz.

Des weiteren danke ich Herrn Prof.Dr.-Ing.B.Heimeshoff, den Abteilungsleitern Herrn Dr.-Ing.M.Kufner, Herrn Prof.Dr.A.Schneider und Herrn Dr.D.Grosser sowie Herrn Dipl.-Ing.D.Henrici für ihre wertvollen Ratschläge und ihre Bereitschaft zur Diskussion aller auftretenden Fragen.

Außerdem gilt mein Dank dem Leiter des Versuchsfeldes, Herrn Ing.H.Sanzi, den Leitern der Werkstatt, Herrn A.Perschina und Herrn F.Aigner sowie allen Institutsangehörigen, die mich bei meiner Arbeit in jeder Weise unterstützt haben.

Weiterhin gilt mein Dank auch den Firmen Danzer (Reutlingen) und Pfeleiderer (Neumarkt) für die kostenlose Lieferung der Versuchshölzer sowie der Firma BASF (Ludwigshafen) für die Bereitstellung der verwendeten Leime.

Nicht zuletzt danke ich auch dem Ghanesischen Kultusministerium und dem Council for Scientific and Industrial Research Ghanas für die Ermöglichung meines Studiums in der Bundesrepublik Deutschland.

München, Juli 1978

Augustus G. Addae-Mensah

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
1.1. Wirtschaftliche und technische Bedeutung des gestellten Themas	1
1.2. Entwicklung der Leimtechnik	2
1.3. Vorteile der Holzleimtechnik	6
1.4. Probleme der Holzleimtechnik	7
1.5. Klimatische Voraussetzungen in West- Afrika unter besonderer Berücksichti- gung von Ghana	9
2. Versuchsmaterial	14
2.1. Holzartenbeschreibung	14
2.1.1. Allgemeines	14
2.1.2. Beschreibung von Khaya	15
2.1.3. Beschreibung von Abachi	17
2.1.4. Vorkommen von Khaya und Abachi	18
2.1.5. Beschreibung der gelieferten Bohlen	20
2.2. Leime	23
2.2.1. Allgemeines	23
2.2.2. Phenol-Resorcin-Formaldehyd- Harzleim, Kauresin 440 flüssig	25
2.2.3. Harnstoff-Formaldehyd-Harzleim Kaurit 220 Pulver	25
3. Gewählte Klimabeanspruchungen	27
3.1. Allgemeines	27
3.2. Normalklima	27
3.3. Heiß-Feucht-Konstantklima	28
3.4. Heiß-Feucht-Wechselklima sowie Kalt- und Heißwasserlagerung der verleimten fehler- freien Kleinproben	28

4.	Bestimmung der physikalischen Eigenschaften von fehlerfreien Kleinproben	33
4.1.	Probenherstellung	33
4.2.	Prüfverfahren und Versuchsdurchführung	33
4.2.1.	Klimatisierung der Proben	33
4.2.2.	Rohdichte und Feuchtigkeitsgehalt	33
4.2.3.	Sorptionseigenschaften	34
4.2.4.	Bestimmung der Extraktstoffanteile in Abachi und Khaya	36
4.3.	V Versuchsergebnisse	37
4.3.1.	Rohdichte und Sorptionseigenschaften	37
4.3.2.	Extraktstoffanteile	44
4.4.	Diskussion der Versuchsergebnisse	44
5.	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von fehlerfreien Kleinproben	46
5.1.	Probenherstellung	46
5.2.	Klimatisieren der Proben	50
5.3.	Prüfverfahren und Versuchsdurchführung	51
5.3.1.	Allgemeines	51
5.3.2.	Druckfestigkeit (σ_D)	51
5.3.3.	Zugfestigkeit (σ_Z)	52
5.3.4.	Biegefestigkeit und Biege-E-Modul (σ_B und E_B)	53
5.3.5.	Scherfestigkeit (τ_s)	55
5.3.5.	Spaltfestigkeit (σ_s)	56
5.3.7.	Bruchschlagarbeit (a_o)	56

	Seite
5.4. Versuchsergebnisse	57
5.4.1. Allgemeines	57
5.4.2. Druckfestigkeit	59
5.4.3. Zugfestigkeit	61
5.4.4. Biegefestigkeit und Biege- E-Modul	64
5.4.5. Scherfestigkeit	69
5.4.6. Spaltfestigkeit	69
5.4.7. Bruchschlagarbeit	70
5.5. Diskussion der Versuchsergebnisse	70
5.5.1. Druckfestigkeit	70
5.5.2. Zugfestigkeit	72
5.5.3. Biegefestigkeit und Biege- E-Modul	72
5.5.4. Scherfestigkeit	74
5.5.5. Bruchschlagarbeit	74
6 Bestimmung der Bindefestigkeit von verleimten fehlerfreien Kleinproben	75
6.1. Probenherstellung	75
6.2. Klimatisierung der Proben	79
6.3. Prüfverfahren und Versuchsdurchführung	81
6.4. Versuchsergebnisse	81
6.5. Diskussion der Versuchsergebnisse	88
7 Prüfung von verleimten Brettschichtträgern	93
7.1. Herstellung der Träger	93
7.2. Klimatisierung der Träger	99
7.3. Prüfverfahren und Versuchsdurchführung	100

	Seite
7.4. Versuchsergebnisse	103
7.5. Diskussion der Versuchsergebnisse	107
8. Überlegungen zur Ableitung zulässiger Spannungen von tropischen Hölzern am Beispiel vom Abachi und Khaya	113
8.1. Allgemeines	113
8.2. Versagenskriterien	114
8.3. Bemessungskriterium und Definition der zulässigen Spannung	115
8.4. Die materialabhängigen Einflußfaktoren k_i	116
8.5. Die materialunabhängigen Sicherheitsfaktoren V_i	121
8.6. Vorschlag für pauschale zulässige Spannungen für Abachi und Khaya	122
8.6.1. Zulässige Spannungen für Biege- und Schubbeanspruchungen	123
8.6.2. Zulässige Spannungen für Druck- und Zugbeanspruchungen	124
8.7. Die Korrekturfaktoren m_i für den Spannungsnachweis	126
8.8. Differenzierte Bestimmung von zulässigen Biegespannungen mit Hilfe der maschinellen Holzsortierung (Bemessungsgerade)	128
8.8.1. Allgemeines	128
8.8.2. Test auf Normalverteilung der Biegefestigkeit σ_B	132
8.8.3. Korrelation zwischen Rohdichte ρ und Druckfestigkeit σ_D sowie zwischen Zugfestigkeit σ_Z und Zug-E-Modul E_Z	134
8.8.4. Korrelation zwischen Biegefestigkeit σ_B und Biege-E-Modul E_B	136
8.8.5. Bestimmung der Bemessungsgeraden (Gerade der zulässigen Biegespannung)	139
9. Zusammenfassung	145
10. Literatur	150

SYMBOLS und ABKÜRZUNGEN

ZEICHEN	BEZEICHNUNG	DIMENSION
A	Fläche	cm^2, mm^2
a	Abstand	$\text{mm}, \text{cm}, \text{m}$
b	Balkenbreite	cm
h	Balkenhöhe	cm
Ls	Stützweite	cm
n	Probenanzahl	
f	Durchbiegung in Balkenmitte	mm
F	Kraft	N (Newton)
m	Masse	g
V	Volumen	mm^3, cm^3
Q	Querkraft	N
M	Biegemoment	$\text{N} \cdot \text{m}, \text{N} \cdot \text{cm}$
W	Widerstandsmoment	cm^3
I	Trägheitsmoment	cm^4
ϑ	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
rLF	relative Luftfeuchtigkeit	$\%$
u	Holzfeuchtigkeit	$\%$
H _B	Holzbruchanteil	$\%$
ρ	Rohdichte	g/cm^3
$\rho_{\sim 12}$	Rohdichte bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit (Normalklima), wobei sich die Holzfeuchtigkeit auf ca. 12 % einstellt	g/cm^3
ρ_0	Rohdichte im gedarrten Zustand	g/cm^3
$\alpha_t, \alpha_r,$ $\alpha_a, \alpha_v,$	Gesamtquellung in tangentialer-, radialer- und axialer Richtung sowie Volumenquellung	$\%$
$\bar{x}$	Mittelwert	
s	Standardabweichung	N/mm^2
V _x	Variationskoeffizient	$\%$
r	Korrelationskoeffizient	
σ	Normalspannung (Festigkeit)	N/mm^2
τ_0	Schubfestigkeit der verleimten Brettschichtträger	N/mm^2

ZEICHEN	BEZEICHNUNG	DIMENSION
τ_B	Bindefestigkeit von verleimten fehlerfreien Kleinproben	N/mm^2
τ_s	Scherfestigkeit	N/mm^2
a_o	Bruchschlagarbeit	kJ/m^2 (Kilojoule/ m^2)
min	minimal	
max	maximal	
zul	zulässig	
<	kleiner als	
>	größer als	
k_i	materialabhängige Einflußfaktoren	
V_i	materialunabhängige Sicherheitsfaktoren	
m_i	Korrekturfaktoren	

Weitere Symbole werden jeweils in dem entsprechenden Text erläutert.

1. Einleitung

1.1. Wirtschaftliche und technische Bedeutung des gestellten Themas

Im Rahmen der Aufbauprogramme vieler tropischer Länder, vor allem auch des holzreichen Landes Ghana, ist im Hinblick auf den Bausektor eine Untersuchung über die Verwendung tropischer Hölzer in der Bauindustrie von großer Wichtigkeit. Die Regierungen sonst rohstoffreicher Länder Afrikas sind oft gezwungen, viele für die Erstellung von Industriebauten, Verwaltungsgebäuden, weitgespannten Hallen, Schul- und Kirchenbauten, Brückenbauten usw. benötigten Baustoffe wie Stahl, Zement usw. einzuführen, wodurch die Devisenbilanz der Länder nicht unerheblich belastet wird.

Die Verwendung einheimischen Holzes ist zum augenblicklichen Zeitpunkt für Bauten in größerem Rahmen nicht möglich, da die entsprechenden Eignungstests fehlen. Mit den in vorliegender Arbeit durchgeführten Untersuchungen soll zur Behebung dieses Mangels beigetragen und dadurch die Verwendung eigener Hölzer in der heimischen Bauindustrie gefördert werden.

Man nimmt an, daß in den Waldgebieten Ghanas, die mit ca. 82 000 km² etwa ein Drittel der Landesoberfläche einnehmen, rund 360 verschiedene, wirtschaftlich nutzbare Holzarten existieren (GHANA TIMBER MARKETING BOARD, 1969). Diese Holzarten sind durch das Council for Scientific and Industrial Research Ghanas in sogenannte "Primary und Secondary Species" eingeteilt worden, welche wiederum in vier Klassen gruppiert sind (ANONYMOUS).

- | | | |
|---------------------|----------|--|
| "Primary Species" | Klasse 1 | - enthält 14 Arten von sehr großer Wirtschaftlichkeit; |
| | Klasse 2 | - sind 12 Arten von weniger großer Wirtschaftlichkeit; |
| "Secondary Species" | Klasse 3 | - sind 23 etwas bekanntere Arten, welche von zukünftiger Wichtigkeit sein können; |
| | Klasse 4 | - sind 310 gut gewachsene Holzarten, die jedoch im internationalen Holzhandel völlig unbekannt sind. |

Die im internationalen Holzhandel bekannten Holzarten Khaya und Abachi können in die Reihe der "Primary species" eingeordnet werden.

Über die Eignung der afrikanischen Hölzer in Baukonstruktionen ist noch wenig bekannt. Zur Zeit werden die nach Europa und Amerika exportierten Hölzer, bei denen es sich hauptsächlich um "Edelhölzer" handelt, überwiegend in der Möbelindustrie und Bautischlerei verwendet. Deshalb bedürfen diese afrikanischen Hölzer noch einer weitergehenden Untersuchung, um deren Eignung für Baukonstruktionen innerhalb der Herkunftsländer festzustellen.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit den afrikanischen Holzarten

"KHAYA" (Khaya ivorensis A.Chev.)

"ABACHI" (Triplochiton scleroxylon K.Schum.).

Beide Holzarten werden in dieser Arbeit im Hinblick auf ihre Verwendung im Holzleimbau untersucht. Vor allem werden physikalische und mechanische Eigenschaften der Hölzer und ihre Verleimbarkeit behandelt. In die Versuche wird ein Vergleich mit den Eigenschaften des Holzes eines europäischen Laubbaumes, der Buche (*Fagus sylvatica*), einbezogen. Die Arbeit liefert Vergleichswerte für die mechanischen Eigenschaften und die Holz-Leim-Bindefestigkeiten bei unterschiedlichen klimatischen Beanspruchungen.

1.2. Entwicklung der Leimtechnik

Die Holzleimtechnik gewann an Bedeutung, nachdem der Deutsche OTTO HETZER im Jahre 1906 für das Zusammenleimen von gehobelten Holzbrettern mit Kaseinleim zu lamellierten Trägern ein Patent erhielt. Diese Form der Konstruktion, welche nach seinem Erfinder als Hetzer-Träger bezeichnet wurde, verbreitete sich jedoch viel rascher außerhalb Deutschlands, besonders in Ländern wie Österreich und der Schweiz. Konstruktionen dieser

Art sind allgemein auch als Schichtholzträger (engl.: "Laminated Beam") sowie unter dem von EGNER (1958) eingeführten Begriff Brettschichtholz oder Brettschichtträger bekannt.

Auf dem nordamerikanischen Kontinent wurde man erst 30 Jahre nach Hetzers Erfindung auf die Schichtholzbauweise aufmerksam (SMITH, 1955). Etwa ab 1954 erlebten die einschlägigen Industrien in den USA einen raschen Aufstieg (vgl. Bild 1).

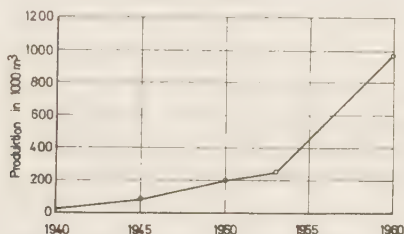


Bild 1: Brettschichtproduktion in den USA, zusammengestellt nach den Angaben der "Organisation for European Economic Co-operation" (OEEC, 1956)

Die rasche Entwicklung der Holzverarbeitung in Amerika und Europa lag allerdings nicht nur an der nun allerorts einsetzenden Holzbauweise, sondern muß auch auf Impulse seitens der Luftwaffe und der Marine zurückgeführt werden. In Canada und den USA wurden z.B. während des 2. Weltkrieges Schiffe und aus Schichtholz gebaute Minensuchboote zum Räumen von Magnet-Minen eingesetzt (SMITH, 1955). Erst nachdem man sich im Holzleimbau auf massive, mechanisch und chemisch vergütete Schichtholztragwerke mit den inzwischen entwickelten, alterungsbeständigen Kunstharzleimen konzentrierte, konnte auch in Europa eine gute Basis für eine wettbewerbsfähige Holzleimbauindustrie geschaffen werden. Seit Mitte der sechziger Jahre wies die Marktentwicklung auch in der Bundesre-

publik Deutschland eine progressive Tendenz auf (Bild 2).

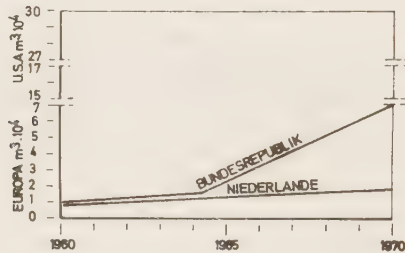


Bild 2: Marktentwicklung in m³ Schichtholz 1960 bis 1970 in der Bundesrepublik Deutschland und in den Niederlanden (nach BOHNY, 1970)

Eines der ersten Länder, in welchem die Hetzer'sche Erfindung praktische Anwendung fand, war die Schweiz. Als Beispiel einer Hetzer-Konstruktion sei der Turm der Universität Zürich genannt; er wurde 1913 erstellt und gilt als eines der ältesten Bauwerke dieser Art (CHUGG, 1964).

Schichtholzbauwerke findet man vor allem auch in den USA und in Canada. Nennenswerte Beispiele sind eine Halle in West Hemstead mit einer Spannweite von 80 m, das riesige Bogentragwerk des "Rainbow Stage"-Theaters in Manitoba, die "Tudor Arches" der Presbyterianischen Kirche in Toronto (SMITH, 1955), die 25 m lange Fußgängerbrücke in Washington (HOYLE, 1975).

Sogar Eisenbahnbrücken aus Schichtholz sind in den USA keine Seltenheit, so z.B. die Eisenbahnbrücke über den Palmer Fluß in Tampa, Florida (SELBO und ANGELL, 1955) und die "Au Train Bridge" in Michigan (TUOMI und BOHANNAN, 1971).

Auch in der chemischen Industrie ist man bei bestimmten Chemikalien dazu übergegangen, anstelle von Stahlhallen, die bekanntlich einer schnellen Korrosion unterliegen, Hallen in Schichtholzkonstruktionen den Vorzug zu geben.

In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, daß im Jahre 1958, anlässlich der Weltausstellung in Brüssel, 20 Pavillons in der Hetzer-Bauweise mit Resorcinharzverleimung erstellt wurden und allgemein große Beachtung fanden (Berichte der ARBEITSGEMEINSCHAFT HOLZ e.V., Ausgabe 2, 1958).

Auch in Deutschland entstanden im Laufe der vergangenen Jahre viele Schwimmhallen, Reithallen und Stadien in Schichtholzbauweise. Beispiele sind der Circus-Krone-Bau, das Olympische Reit- und Radstadion in München sowie eine Anzahl von Mehrzweckhallen im ganzen Bundesgebiet mit Spannweiten bis weit über 40 m (Berichte des INFORMATIONSDIENSTES HOLZ, Blatt A55).

Interessant ist auch, daß man in Rußland Mitte 1950 dazu übergegangen ist, Schichtholzbalken fabrikmäßig herzustellen und diese als Fertigbauteile in der Bauindustrie zu verwenden (GUBENKO, 1957).

Im Gegensatz dazu sind in Afrika, trotz großer Holzvorkommen, kaum Beispiele nennenswerter Bauwerke in Schichtholzbauweise zu finden. Lediglich im Staate Elfenbeinküste werden zur Zeit Untersuchungen über die Verleimbarkeit von Limba durchgeführt (SOCIÉTÉ LAMÉCO, 1973).

Fehlende Kenntnisse wie z.B. über Bewitterungsbedingungen, Haltbarkeit der Verleimung, guten Wärmeschutz und zuverlässige Imprägnierungsmittel und -methoden sind dafür ausschlaggebend, ebenso aber auch die unzureichenden technologischen Voraussetzungen. Um diesem Mangel zu begegnen, wurden auf dem Gelände der Technischen Universität Kumasi, Ghana, Forschungszentrum für low cost housing, seit längerem Versuche über den notwendigen Holzschutz für den Holzhausbau in den Tropen durchgeführt (FALCONER, 1972 und eigene Beobachtungen April 1973).

1.3. Vorteile der Holzleimtechnik

Die Vorteile verleimter Konstruktionen liegen vor allem darin, daß

- a) die Verleimung sich als gutes Verbindungsmittel für Holz erweist, weil andere Verbindungsmittel wie z.B. Nägel, Bolzen usw. nur punktförmig wirken, Leim jedoch eine flächenförmige Kraftübertragung gewährleistet;
- b) durch die Verleimung festigkeitsmindernde Fehlstellen wie Risse oder Äste ausgeglichen werden können. Dies bringt eine Vergütung des Holzes mit sich. So konnte man z.B. in den USA und auch in der Bundesrepublik Deutschland (DIN 1052) die zulässige Spannung von Schichtholz bei Biegung höher ansetzen als die für Vollholz;
- c) die Ausführung größerer Spannweiten als mit Vollholz möglich ist;
- d) man bei Biegeträgern gutes und weniger gutes Material zusammenleimt und trotzdem die Vorteile hochwertigen Materials erzielt. Dabei wird das bessere Material in den Randzonen, an denen die Beanspruchung höher ist, das weniger gute und auch weniger beanspruchte in der Mittelzone untergebracht.

Die Wirtschaftlichkeit eines Holztragwerkes wird entscheidend beeinflusst durch die Spannweite, die Tragwerksform, den Querschnittsaufbau (Bild 3) sowie durch die Herstellungskosten.

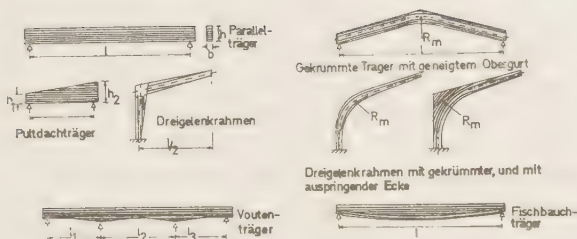


Bild 3: Einige Träger- und Rahmenformen aus Brett-schichtholz

Es wurde festgestellt, daß bei Bauwerken mit Zunahme der Spannweite, besonders bei Tragwerken von ca. 60 m bis 100 m freier Stützweite, mit 30 kg bis 65 kg Schichtholz je m^2 Dachfläche, Kosteneinsparungen von 25 % bis 40 % gegenüber Stahl- und Betonkonstruktionen erzielt werden können (v.HALASZ, 1966). Dabei ist der höhere Dämmwert bei Bränden infolge fortschreitender Verkohlung noch nicht als Vorteil berücksichtigt.

1.4. Probleme der Holzleimtechnik

Alle Arbeitsgänge bei der Herstellung von Schichtholz, wie Trocknung, Verleimung usw. stellen ein erhebliches wirtschaftliches Problem dar. Erfahrene Facharbeiter und ausgebildetes Personal zur Überwachung des Arbeitsablaufes sind unentbehrlich. Für Entwicklungsländer kommt das Kostenproblem der Einfuhr von Leimen und Geräten hinzu. Wenn man jedoch die erheblichen Kosten für andere Baumaterialien, wie Stahl, Zement usw. bedenkt, soweit sie eingeführt werden müssen, so ist zu fragen, ob die Verleimung einheimischer Hölzer an vielen Stellen nicht das wirtschaftlichere Verfahren wäre.

Die zur Zeit der Patentanmeldung von Hetzer verwendeten Ka-

seinleime waren gegen Witterungs- und Feuchtigkeitseinflüsse wenig beständig. Leimverbindungen in einer Holzkonstruktion sind aber häufig wechselnden klimatischen Bedingungen ausgesetzt, so daß an die Beständigkeit des verwendeten Leimes hohe Anforderungen gestellt werden müssen. Betrachten wir die aus geleimten Trägern zusammengesetzten Konstruktionen, etwa eine Halle oder eine Brücke, so wirken hier zunächst äußere Kräfte auf die Leimverbindung ein. Es sind dies die statische Dauerbeanspruchung der Konstruktion durch ihr Eigengewicht, erhöht durch zeitweilige zusätzliche dynamische Beanspruchung durch Wind- und Bremskräfte z.B. bei Brücken sowie durch die nach den entsprechenden Vorschriften anzusetzenden Schnee- und Verkehrslasten. Hinzu kommen Beanspruchungen durch klimatische Einflüsse, wobei ein ständiger Wechsel der Luftfeuchtigkeit sich besonders gefährlich auswirken kann, indem er zu ständiger Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit und damit zu Schwind- und Quellverformungen im Holz führt.

Wird die dem Leim zur Aushärtung beigegebene Säure durch den Aushärtungsvorgang nicht völlig gebunden, sondern bleibt partiell als freie Säure im Leim zurück, so kann diese in das Holz abwandern, die Holzfaser an der Leimfläche zerstören und dadurch die Faserverbindungen lösen, was zu einer Festigkeitsminderung der Leimverbindung führt (DELMONTE, 1974).

Erst nach der Entwicklung von Leimen auf Kunstharzbasis gelang ein grundsätzlicher Wandel in der Erzeugung von feuchtigkeitsbeständigen Leimen. Die Möglichkeit, diese Kunstharzleime im Kaltverfahren zu verarbeiten, macht die Leimtechnik im Bauwesen voll einsatzfähig. Bei der Konstruktion von Brücken, Hallen und ähnlichen Baukonstruktionen gewann sie zunehmend an Bedeutung.

Beim Einsatz von Holzkonstruktionen in tropischen Gebieten wird häufig die Intensität der Klimabeanspruchung unterschätzt. Diese und andere Schwierigkeiten machen deutlich, wie wichtig es ist, Untersuchungen zu intensivieren, durch die festgestellt werden kann, in welchem Ausmaß die bei der Ausführung technischer Holzkonstruktionen verwendeten Leime den im Bauwesen besonders hohen Anforderungen entsprechen, und welche Maßnahmen fertigungstechnischer Art geeignet sind, um ausreichende Sicherheit geleimter Konstruktionen allgemein und speziell in tropischen Ländern zu gewährleisten.

Als Beitrag zu dieser Frage wird im folgenden über das Ergebnis von Versuchen berichtet, die sich mit dem Festigkeitsverhalten von Leimverbindungen bei extremen klimatischen Bedingungen befassen, z.B. eine in den Tropen vorkommende Dauerwirkung von feuchtigkeitsgesättigter Luft. Der Zweck der Versuche ist, klare Erkenntnisse bei der Vielgestalt der praktisch denkbaren Einflüsse zu gewinnen und außerdem Vorschläge zur Aufstellung von Prüfrichtlinien zur Bestimmung der Feuchtbefestigkeit zu erhalten.

1.5. Klimatische Voraussetzungen in West-Afrika unter besonderer Berücksichtigung von Ghana

In extrem feuchtem Klima nehmen Hölzer wegen der ihnen eigenen Hygroskopizität Feuchtigkeit auf, die bei konstantem Feuchtklima einem Gleichgewichtszustand zustrebt. In die Leimfugen an den äußeren Flächen der Holzteile kann Feuchtigkeit in den Leim eindringen und damit die hier wirksamen und für die Festigkeit der Verbindung maßgeblichen inneren kohäsiven Kräfte des Bindemittels verringern. Außerdem kann auf dem Umweg über das Holz Feuchtigkeit in die Leimsubstanz eindringen und damit ebenfalls die Festigkeitsminderung der Bindesubstanz herbeiführen. Die Feuchtigkeitsaufnahme im Holz hat außerdem Quellungserscheinungen zur Folge. Quillt das Holz geleimter Teile durch Feuchtigkeitsaufnahme, so muß damit gerechnet werden, daß spröder Leim an dieser Formänderung nicht teilnimmt und der Faserverbund an den Grenzflächen von Leim und Holz ge-

löst wird.

Nicht allein das direkte Eindringen von Wasser in eine Leimfuge oder in das Holz können eine Gefahr bedeuten, sondern ebenso die extremen Witterungsbedingungen, denen das Holz im heiß-feuchten Äquatorialklima ausgesetzt ist.

Im Vergleich zu Mitteleuropa sind folgende klimatische Parameter besonders zu beachten:

Temperatur, Sonneneinstrahlung, starke Regenfälle, Luftfeuchtigkeit und Windbewegung, wobei in dieser Arbeit nur die Einflüsse aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie Wasserlagerung, als annähernder Vergleich bei Regenfall, untersucht werden. Der besonders wichtige Einfluß der Sonneneinstrahlung muß durch Dauerversuche in dem entsprechenden Land verfolgt werden.

So liegen die jährlichen Durchschnittstemperaturen z.B. in Ghana zwischen 25°C und 40°C , die jährlichen Niederschlagsmengen weit über 2000 mm, Extremwerte bis zu 5000 mm können vorkommen. Die relative Luftfeuchtigkeit liegt zwischen 65 % am Tag und bis zu 100 % während der nächtlichen Stunden.

Das bestimmende Element des Klimas in West-Afrika und somit auch in Ghana ist die Luftzirkulation der Passatwinde über dieser Region (Bild 4):

die tropischen kontinentalen Luftmassen (cT-air-mass
oder Nord-Ost-Passat)

die tropischen maritimen Luftmassen (mT-air-mass
oder Süd-Ost-Passat)

sowie der vermutlich aus dem Indischen Ozean kommende
äquatoriale Ostwind (equatorial easterly-air-mass:
E-air-mass).

Die cT-Luftmassen haben ihren Ursprung in der Sahara; sie

werden durch die Coriolis-Kraft in westlicher Richtung, also nach Ghana und in die Nachbargebiete abgelenkt.

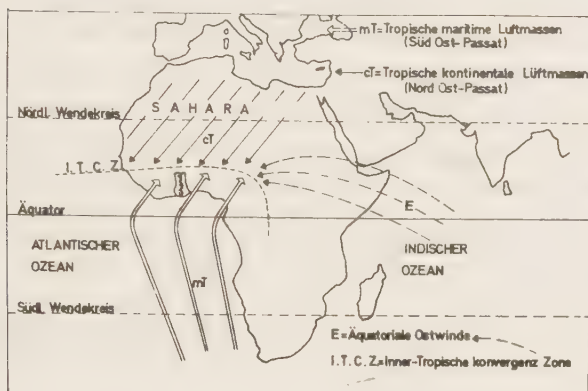


Bild 4: Schema der Windzirkulation über West-Afrika nach DICKSON und BENNEH - A NEW GEOGRAPHY OF GHANA (1973)

Die cT-Luftmassen, die sehr trocken und staubig sind, treffen Ghana zwischen November und Februar. Diese Windzirkulation trägt die Bezeichnung "Harmattan". In diesen Monaten herrscht am Tag Hitze und Trockenheit, wobei manchmal die relative Luftfeuchtigkeit weit unter 60 % sinkt und Temperaturen bis über 38°C (100° F) auftreten, die nächtliche Abkühlung führt jedoch zu Temperaturen bis ca. 21°C (70° F).

Für die Lagerung von Proben im Wechselklima, welches dem tropischen etwa entspricht, wurden deshalb für diese Arbeit die Grenzwerte auf 40°C und 20°C festgelegt (vgl. 3.4.).

Die mT-Luftmassen bewegen sich, vom Süd-Atlantik kommend, in nord-westlicher Richtung. Auch sie werden durch die Erddrehung in westlicher Richtung abgelenkt. Ihr hoher Feuchtigkeits-

gehalt (bis 98 %) verursacht erhebliche Wolkenbildung.

Über die Herkunft der E-Luftmassen ist wenig bekannt. Man vermutet, daß diese aus dem Indischen Ozean stammen. Die Feuchtigkeit ist geringer als die der mT-Luftmassen. Trotzdem kommt es bei Eintreffen der E-Luftmassen häufig zu sehr starken Niederschlägen mit heftigen Gewittern und Regenstürmen, und dies dann meist in den Nachmittagsstunden. In West-Afrika spricht man hier von "line squalls".

Die Windgeschwindigkeiten liegen zwischen 8 km/h und 16 km/h. Sie sind im August am höchsten und zwischen November und Januar am niedrigsten. Nachfolgende graphische Darstellung erläutert die klimatische Situation in Ghana an drei repräsentativen Orten:

Navrongo, Kumasi und Axim (siehe Landkarte Ghanas - Bild 7).

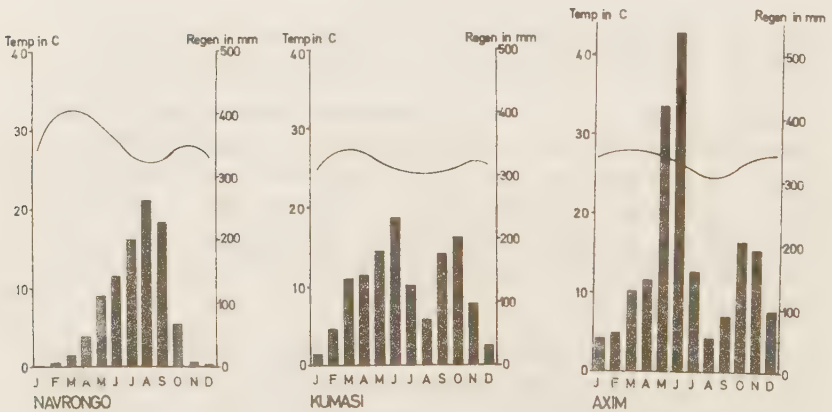


Bild 5: Monatliche durchschnittliche Temperaturen und Niederschläge nach BOATENG - GEOGRAPHY OF GHANA (1970)
(durchgezogene Kurve = Temperaturverlauf)

Obige Diagramme (Bild 5) zeigen, daß

- 1) die niedrigsten Temperaturen im Januar und gegen August herrschen;
(Aus Ghana liegen für Februar 1962 und Dezember 1963 Meßwerte von nur 9°C vor.)
- 2) Temperaturhöchstwerte, vor Beginn der Regenzeit, von Februar bis April auftreten;
- 3) die jährliche Durchschnittstemperatur über 25°C liegt;
- 4) die höchste Niederschlagsmenge zwischen Mai und Juli sowie September und Oktober gemessen wird.

2. Versuchsmaterial

2.1. Holzartenbeschreibung

2.1.1. Allgemeines

In Europa werden Brettschichtkonstruktionen vorwiegend aus Fichte (*Picea abies*) und Tanne (*Abies alba*), aber auch aus Kiefer (*Pinus sylvestris*) hergestellt. Über die Verwendung dieser Holzarten liegen langjährige Erfahrungen vor und ihre Eigenschaftswerte sind gut bekannt. In den USA werden als Bauholz hauptsächlich Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Western yellow pine (*Pinus ponderosa*) verwendet.

Obwohl Afrika einer der größten Holzproduzenten der Welt ist, liegen hier keine ausreichenden wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Verwendung von einheimischen Hölzern für Bauzwecke vor. Vorhandene Aufzeichnungen aus praktischen Erfahrungen einheimischer Zimmerleute sowie Berichte von Angehörigen ehemaliger Kolonialmächte reichen nicht aus, um Holz für Haus- und Industriebauten optimal verwenden zu können. So ist z.B. in Ghana häufig festzustellen, daß der Dachstuhl eines einfachen Hauses aus überdimensionalen Balken oder Kanthölzern besteht. Im Hinblick auf die mangelhafte fachliche Ausbildung scheint dies nicht allzu verwunderlich.

Um die Verwendung weiterer afrikanischer Holzarten als Bauholz zu fördern und gut verleimbare Holzarten aufzufinden, wurde anlässlich einer Besprechung zwischen dem Institut für Holzforschung München und Fachleuten der Holzimportfirma Danzer in Reutlingen, Bundesrepublik Deutschland, Khaya (*Khaya* spp.) und Abachi (*Triplochiton scleroxylon*) als besonders geeignet ausgewählt und für die erforderlichen Untersuchungen bestimmt. Dabei ging man von der Überlegung aus, daß beide Holzarten in ausreichender Menge vorhanden und damit von wirtschaftlichem Interesse für die Herkunftsländer einerseits für den Eigenverbrauch, andererseits aber auch für den Export nach Übersee sind. Vor allem muß daran gedacht werden, Holz vorzugsweise anstelle von teuer zu importierendem Stahl, Zement oder son-

stigen Baumaterialien einzusetzen.

Das Untersuchungsmaterial lieferte freundlicherweise die bereits genannte Firma Danzer in Reutlingen. Die Hölzer stammten aus deren Einzugsgebiet an der Elfenbeinküste. Zum Vergleich der Eigenschaftswerte der genannten tropischen Holzarten mit einem europäischen Laubholz wurde Buchenholz gewählt, das von der Firma Pfeleiderer in Neumarkt/Pfalz in Form von gedämpften Kantholz zur Verfügung gestellt wurde.

2.1.2. Beschreibung von Khaya¹⁾

a) Name	:	Khaya
botanischer Name:		Khaya ivorensis A.Chev. (Khaya klainei Pierre)
Familie	:	Meliaceae

Nach DIN 4076/1 wird das Holz in der Bundesrepublik Deutschland mit folgenden Namen bezeichnet:

<u>Benennung</u>	<u>Abkürzung</u>	<u>weitere Handelsnamen</u>
Khaya-Mahagoni	MAA	Grand Bassam, N'Gollon, African Mahogany Acajou blanc

Daneben sind in einschlägiger Literatur häufig die Bezeichnungen afrikanisches Mahagoni oder, entsprechend der Nomenklatur der A.T.I.B.T., Acajou d'Afrique für Khaya ivorensis

1) Die Beschreibung der Holzarten Khaya (2.1.2.) und Abachi (2.1.3.) erfolgte nach unten aufgeführter Literatur:

ASSOCIATION COLONIE-SCIENCES et COMITE NATIONAL des BOIS COLONIAUX, 1929/30; A.T.I.B.T., 1975; LE CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL, 1960; DAHMS, 1968; FARMER, 1972; GHANA TIMBER MARKETING BOARD, 1969; GOTTFELD, 1958; INFORMATIONSDIENST HOLZ E.V., 1976; NAIRN, COX u. JOHNSON, 1957; RENDLE, 1969; SCHEIBER, 1965; WAGENFÜHR und SCHEIBER, 1974.

sowie für andere Khaya-Arten wie *Khaya anthotheca*, *Khaya grandifolia*, *Khaya nyasica* oder *Khaya senegalensis* zu finden.

Je nach Provenienz oder Verschiffungshafen wird *Khaya ivorensis* auch unter der Bezeichnung Takoradi-Mahogany oder Ahafo-Mahogany (Ghana) Lagos-Mahogany (Nigeria), D'dola (Gabun) usw. gehandelt.

b) Der Baum:

Khaya ivorensis ist in die Kategorie der Urwaldriesen einzustufen, deren Wuchshöhe in der Regel zwischen 35 m und 40 m liegt. Unter günstigen Bedingungen kann dieser Baum jedoch auch 55 m bis 60 m hoch werden. Sein Durchmesser liegt bei 1,5 m bis 2 m. Seine mächtigen Brettwurzelanläufe erreichen eine Höhe von ca. 2 m.

Der Stamm ist gut geformt und liefert bis 20 m astfreies Nutzholz. Er ist mit einer ca. 1 cm bis 2 cm dicken Rinde bedeckt, die außen einen dunkelgrauen bis schwarzen Farbton aufweist, während das Innere der Rinde rötlich gefärbt ist.

c) Das Holz:

Das Splintholz hat eine Stärke bis zu 50 mm, seine Farbe ist creme bis rosagrau. Das frische Kernholz zeigt einen rosa Farbton, ans Licht gebracht dunkelt das Holz dann rotbraun nach. Die Poren sind grob zerstreut, die Zuwachszonen im Querschnitt durch unterschiedliche Porendichte gut erkennbar, Gefäße sowie Holzstrahlen sind im Querschnitt ohne Lupe noch deutlich zu sehen.

Auf Längsflächen treten die Holzstrahlen als feine Striche (tangential) bzw. als Spiegel (radial) in Erscheinung. Die Porenrillen zeigen häufig dunkle Einlagerungen von Gerbstoffen.

Das Holz hat zumeist schlichte Textur und gelegentlich deutlich ausgeprägten Wechseldrehwuchs. Die Drehwüchsigkeit von

Khaya ist im Furnierhandel als "Drapé" oder "Moiré" sehr beliebt, weil sie die bekannte streifenwellige Struktur der Khayafurniere ergibt.

2.1.3. Beschreibung von Abachi¹⁾

a) Name : Abachi

botanischer Name: Triplochiton scleroxylon K.Schum.

Familie : Sterculiaceae

In der Bundesrepublik Deutschland wird das Holz nach DIN 4076/1 mit folgenden Namen bezeichnet:

<u>Benennung</u>	<u>Abkürzung</u>	<u>weitere Handelsnamen</u>
Abachi	ABA	Ayous, Obeche, Samba, Wawa

Im deutschen Holzhandel ist das Holz unter der Bezeichnung Abachi bekannt, während am englischen bzw. französischen Holzmarkt die Bezeichnungen Wawa und Samba gebräuchlich sind.

b) Der Baum:

Es handelt sich um einen Baum von ca. 30 m bis 50 m Höhe, der bis zu 25 m astfreie Stammlänge erreicht. Die Rinde des Stammes, die 1 cm bis 3 cm dick ist, ist glatt und weich und weist einen grauen bis dunkelgrauen Farbton auf. Das aus Ghana stammende Holz zeichnet sich durch besonders guten Wuchs aus. Der Baum erreicht häufig einen Durchmesser von mehr als 2 m.

Noch heute stellt Abachi (in Ghana als Wawa-Baum bezeichnet) aufgrund seiner riesigen Ausmaße für die Dorfbewohner Ghanas ein Wunder dar. Er wird als Gottesgeschenk verehrt und nicht selten bei der Gründung eines Dorfes als Zentrum gewählt und zum Zwecke der Anbetung umzäunt.

1) siehe Fußnote 1) auf Seite 15

c) Das Holz:

Das Splintholz ist vom Kernholz kaum zu unterscheiden. Sein Farbton ist elfenbein bis strohgelb. Abachi hat eine schlichte gefladerte Textur. Die Zuwachszonen sind durch unterschiedliche Porendichte und Porengröße gekennzeichnet. Die Holzstrahlen sind im Querschnitt mit bloßem Auge und im Radialschnitt als helle Spiegel sichtbar.

2.1.4. Vorkommen von Khaya und Abachi

Die beiden hier untersuchten Holzarten sind in den west-afrikanischen Regenwäldern von Guinea über die Elfenbeinküste, Ghana, Nigeria und Gabun bis in die Cabinda-Enklave der Republik Angola weit verbreitet. Nach DAHMS (1968) wird als Hauptwuchsgebiet für Abachi die Feuchtsavannenzonen von Liberia, Elfenbeinküste, Ghana, Nigeria und Westkamerun angegeben. Khaya bevorzugt dagegen die immergrünen Regenwälder mit ihren hohen Temperaturen und gleichbleibender Luftfeuchtigkeit (vgl. Bild 6, Waldverbreitung in West-Afrika).

In Bild 7 sind außerdem noch die speziell in Ghana vorkommenden Waldformationen dargestellt.

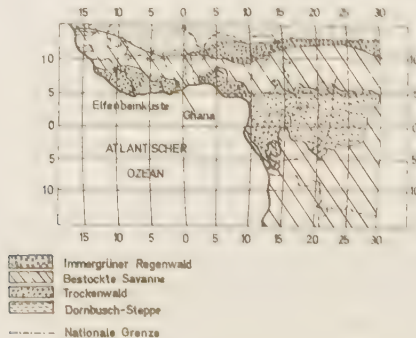


Bild 6: Waldverbreitung in West-Afrika; zusammengestellt aus einer Publikation des CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL (1960) und DAHMS (1968)



Bild 7: Waldformationen von Ghana; zusammengestellt nach PORTEFOLIO OF GHANA MAPS (1961) und MANSHARD (1961)

Aus Bild 8 ist zu ersehen, daß Khaya und Abachi in Ghana nördlich des Äquators und westlich des Längengrades 0 reichlich und vielfach im gleichen Wuchsgebiet vorkommen.

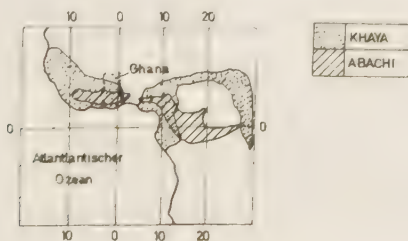


Bild 8: Verbreitung von Khaya und Abachi in West-Afrika; zusammengestellt nach DAHMS (1968)

2.1.5. Beschreibung der gelieferten Bohlen

Die von der Firma Danzer gelieferten Stämme trafen im Institut für Holzforschung als geschnittene Blockware ein.

Bei Eintreffen des Holzes im Institut wurden die in Tabelle 1 angegebenen Feuchtigkeitsgehalte in % festgestellt.

Die genannten Feuchtigkeitswerte in Tabelle 1 wurden jeweils an fünf Darr-Proben, die aus verschiedenen Stellen des betreffenden Blockes stammen, ermittelt.

Um die Zusammengehörigkeit der Stämme zu demonstrieren, wurden die Bohlen, wie in den Bildern 9 bis 12 zu erkennen ist, durch Zusammenlegen in ihre Ursprungsform gebracht. Daraus ergab sich folgende Tabelle:

Tabelle 1: Anzahl, Abmessungen und Feuchtigkeitsgehalt der gelieferten Bohlen

Holzart	Block	Bohlen					Feuchtig- keit %
		Anzahl	Dicke (cm)	max.Breite (cm)	Länge (cm)	Nr.	
KHAYA	1	6	5	95	222	3/25609-2	12
KHAYA	2	8	5	101,5	227	3/25609	15
KHAYA	3	10	5	80,5	267	3/26754	17
ABACHI	4	7	5,5	114	442	-	11,9
ABACHI	5	7	5,5	99,5	421	-	11,8

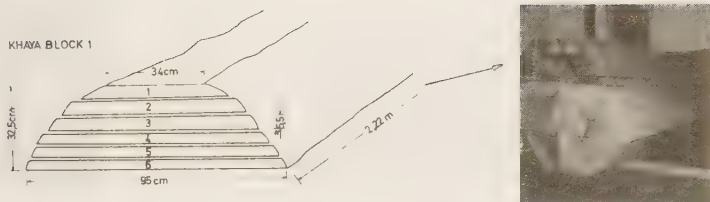


Bild 9: KHAYA Block 1 - Nr. 3/25609-2

6 Bohlen je 5 cm dick, Durchmesser = 95 cm
Länge = 2,22 m

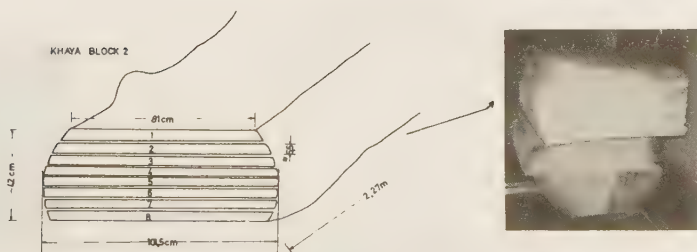


Bild 10: KHAYA Block 2 - Nr. 3/25609

8 Bohlen je 5 cm dick, Durchmesser = 101,5 cm
Länge = 2,27 m

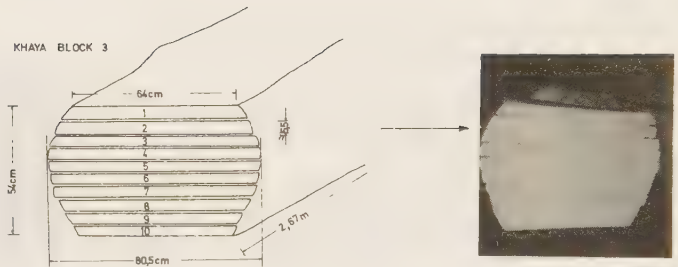


Bild 11: KHAYA Block 3 - Nr. 3/26754

10 Bohlen je 5 cm dick, Durchmesser = 80,5 cm
Länge 2,67 m

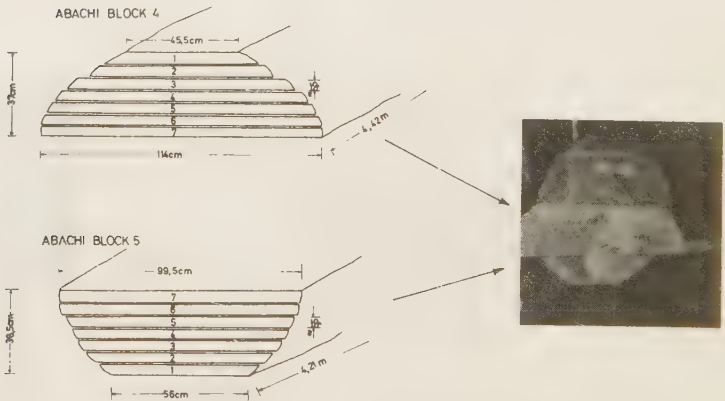


Bild 12: ABACHI Block 4 - 7 Bohlen je 5,5 cm dick
Durchmesser = 114 cm, Länge = 4,12 m
und
ABACHI Block 5 - 7 Bohlen je 5,5 cm dick
Durchmesser = 99,5 cm, Länge = 4,21 m

Die Blöcke 1 und 2 stammen aus ein und demselben Khaya-Baum, Block 3 jedoch aus einem anderen.

Die beiden Abachi-Blöcke 4 und 5 stammen aus verschiedenen Bäumen.

Bretter mit Rissen wurden aussortiert, ebenso die Bohlen Nr 1 und 2 aus dem Khaya-Baum, Block 3, die in bezug auf Äste besonders fehlerreich waren, vgl. auch Bild 13.

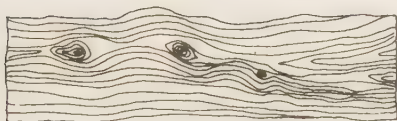


Bild 13: Bohle Nr.2 aus Khaya Block 3

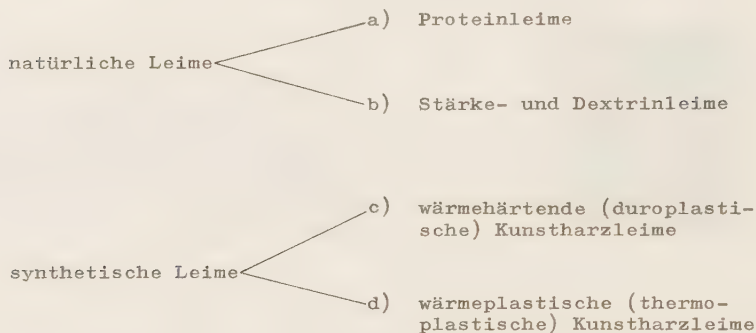
2.2. Leime

2.2.1. Allgemeines

Für die Auswahl von Holzleimen zur Verwendung in einem tropischen Heiß-Feucht-Klima ist die Wasser- und Hitzebeständigkeit des Leimes die ausschlaggebende Eigenschaft. Im Handel ist zwar eine große Anzahl von Leimen vorhanden, aber nur verhältnismäßig wenige Leime sind wasser- und hitzebeständig. Für die Verwendung im konstruktiven Holz-Leimbau kommen nur wenige in Betracht.

Man unterscheidet zwischen Leimen, die mit natürlichen und solchen, die mit synthetischen Ausgangsstoffen hergestellt sind.

KOLLMANN (1955) trifft folgende Einteilung:



- a) Zu den Proteinleimen gehören die Glutin- oder Hautleime, die Kaseinleime, die Sojaleime und die Blutalbuminleime.
- b) Die Stärke- und Dextrinleime werden aus Pflanzen gewonnen, z.B. aus Reis-, Mais-, Weizen- und Kartoffelstärke.
- c) Duroplastische Kunstharzleime sind z.B. die Harnstoff-Formaldehyd-Harzleime, Resorcin-Harzleime, Polyurethan-Harzleime und Äthoxylen-Harzleime.
- d) Zu den thermoplastischen Kunstharzleimen zählen die Leime, die aus Polyvinylchlorid oder Polyvinylazetat hergestellt werden.

Nach Erkundung der in der Bauholzverleimung gebräuchlichsten Kunstharzleime wurde für vorliegende Untersuchungen ein Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harzleim und ein Harnstoff-Formaldehyd-Harzleim ausgewählt.

Als Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harzleim wurde Kauresin-Leim 440

und als Harnstoff-Formaldehyd-Harzleim Kaurit-Leim 220 der Badischen Anilin- und Soda-Fabrik AG verwendet.

2.2.2. Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harzleim

- Kauresin 440 flüssig

Kauresin-Leim 440 ist eine wässrige Lösung eines Phenol- und Resorcin-Formaldehyd-Kondensationsproduktes. Der Leim ist fugenfüllend und ergibt zusammen mit einem Kauresin-Härter eine koch- und wetterfeste Verleimung. Deshalb wird speziell dieser Leim im Ingenieurholzbau und bei Konstruktionen, die starken klimatischen Schwankungen ausgesetzt sind, verwendet. Die Verarbeitung erfolgt im Kaltverfahren. Als Mischungsverhältnis werden laut Gebrauchsanweisung 100 Gewichtsanteile Kauresin 440 mit 20 Gewichtsanteilen Kauresin-Härter 444 vorgeschrieben.

Dieser Leim wird in dieser Arbeit weiterhin nur als Kauresin bezeichnet.

2.2.3. Harnstoff-Formaldehyd-Harzleim

- Kaurit 220 Pulver

Dieser im Holzleimbau sowie in der Spanplattenherstellung verwendete Leim ist ein Kondensationsprodukt aus Harnstoff und Formaldehyd. Die Verarbeitung erfolgt vorwiegend im Kaltverfahren mit dem Härter 30. Der Leim ist sowohl für Weichholz als auch für Hartholz geeignet; die Holzfeuchtigkeit sollte bei der Verleimung zwischen 8 % bis 12 % betragen.

Der Leim kann nach zwei Verfahren verarbeitet werden; nach dem Untermisch- oder nach dem Vorstrichverfahren. Beim Untermischverfahren werden die verschiedenen Bestandteile des Leimansatzes, d.h. Leim, Härter, Füllmittel und Verdünnungswasser im vorgeschriebenen Mischverhältnis miteinander verrührt und die fertige Mischung auf die zu verleimenden Flächen aufgetragen. Beim Vorstrichverfahren wird der Leim und die Härterlösung je auf eine der zu verleimenden Holzflächen getrennt aufgetragen.

Kaurit-Leim ist zwar gut wasserbeständig, jedoch nicht koch-

fest. In dieser Arbeit wurden die Proben kalt verleimt und der Leim nach dem Vorstrichverfahren aufgetragen. Die Gebrauchsanweisung für die Kaltverleimung schreibt folgendes vor:

Pulver-Lösung: 2,5 G.T. Leim mit 1 G.T. kaltem Wasser

Härter-Lösung: 15 G.T. Härter mit 85 G.T. kaltem Wasser.

Der Leim wird in dieser Arbeit weiterhin nur als Kaurit bezeichnet.

3. Gewählte Klimabeanspruchung

3.1. Allgemeines

Es ist bekannt, daß die Eigenschaften und das Verhalten von Werkstoffen, vor allem von Holz, sehr von ihrer Temperatur und ihrem Feuchtigkeitsgehalt abhängen. Deshalb werden bestimmte Klimate zur Prüfung von Werkstoffen festgelegt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. In der Baustoffprüfung werden in der Regel Klimate wie z.B. Normalklima (DIN 50014), Konstantklima (DIN 50015), Feucht-Wechselklima (DIN 50016), Schwitzwasserklima (DIN 50017) sowie Freiluftklima (DIN 50019) festgelegt.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden das Normalklima, daß Heiß-Feucht-Konstantklima sowie das Heiß-Feucht-Wechselklima zugrunde gelegt.

Außerdem wurde bei den kleinen verleimten fehlerfreien Proben eine Versuchsreihe nach Wasserlagerung untersucht. Innerhalb dieser Versuchsreihe wurden insgesamt 14 verschiedene Lagerungs- oder Vorbehandlungsarten durchgeführt. In Tabelle 2 sind diese mit den Ziffern 10 - 140 versehen. Für jede der 14 verschiedenen Behandlungsarten wurden jeweils 10 Proben verwendet. In Tabelle 3 werden die in Tabelle 2 verwendeten Begriffe wie z.B. "Normalklima", "kaltes Wasser" usw. näher erläutert. Behandlungsart 10 entspricht z.B. der Lagerung in einem unter 3.2. beschriebenen Normalklima.

3.2. Normalklima

Die Prüfung fehlerfreier Kleinproben aus Holz unter gleichen Bedingungen ergibt Festigkeitswerte, die zum Vergleich der Eigenschaften verschiedener Holzarten geeignet sind. Da Holz sich aufgrund seiner großen Hygroskopizität dem Feuchtigkeitszustand des umgebenden Klimas anpaßt, ist es wichtig, daß die Prüfbedingungen und auch der Probenzustand einheitlich festgelegt werden.

DIN 52180 schreibt z.B. eine Prüfung entweder im frischen Zu-

stand oder bei einem Feuchtigkeitsgehalt von etwa 12 % vor.

Bei Holz ist das Erreichen der 12 %igen Feuchtigkeit im allgemeinen durch die Lagerung in einem Klima von $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ und 65 ± 5 % relativer Luftfeuchtigkeit zu erzielen. Nach DIN 50014 wird dieses Klima als Normalklima bezeichnet und es entspricht etwa den mittleren Klimabedingungen in den gemäßigten Zonen. Bei diesem Klima wurden geprüft:

- 1) fehlerfreie Kleinproben für die Prüfung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften (Kapitel 4 und 5);
- 2) die verleimten fehlerfreien Kleinproben der Behandlungsart 10 (Tabelle 2) zur Bestimmung der Bindefestigkeit;
- 3) die erste Gruppe der verleimten Brettschichtträger (Kapitel 7.2.).

3.3. Heiß-Feucht-Konstantklima

In einem Konstantklima wird ein bestimmter Temperatur- und Feuchtigkeitszustand der Proben konstant gehalten, z.B. extrem kalt und trocken oder extrem feucht und heiß. In diesem Klima werden die Proben vor der Prüfung so lange gelagert, bis sie einen Gleichgewichtszustand erreicht haben.

Als heiß-feuchtes Konstantklima wurden für diese Arbeit die Klimawerte von $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ und 95 % relativer Luftfeuchtigkeit festgelegt (Kapitel 7.2.), die den höchsten, in Ghana möglicherweise zu erwartenden Klimawerten entsprechen. In diesem Klima wurde die zweite Hälfte der hergestellten Brettschichtträger klimatisiert. Eine Lagerung im heiß-feuchten Wechselklima in einem vorhandenen Klimaschrank war wegen der Größe der Träger leider nicht möglich.

3.4. Heiß-Feucht-Wechselklima sowie Kalt- und Heißwasserlagerung der verleimten fehlerfreien Kleinproben

Um das Verhalten geleimter Konstruktionen unter extremen,

wechselnden Klimabedingungen zuverlässig beurteilen zu können, wurden verleimte fehlerfreie Proben eben solchen klimatischen Bedingungen ausgesetzt, bevor die Prüfung durchgeführt wurde.

Die Behandlungsarten 20 und 140 (Tabelle 2) entsprechen der Lagerung in einem heiß-feuchten Wechselklima. Nach DIN 50016 besteht die Beanspruchung in einem Wechselklima darin, daß durch abwechselnde Anwendung der Klimate $23^{\circ}\text{C}/83\%$ relative Luftfeuchtigkeit und $40^{\circ}\text{C}/95\%$ relative Luftfeuchtigkeit (verkürzt 23/83 und 40/95) feuchte Luft und Schwitzwasser auf die Proben einwirken.

Abweichend von den Werten der DIN-Norm wurde hier an Hand von zwei selbst angefertigten Regelscheiben der Verlauf der in Ghana herrschenden Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit während eines 24-Stunden-Zyklus simuliert.

Zur Wahl der Klimawerte wurden die extremen Tag- und Nachtschwankungen, welche durch die cT- und mT-Luftmassen hervorgerufen werden, zugrunde gelegt (Kapitel 1.5.). Diese stellen die ungünstigsten Witterungsbedingungen für Ghana dar. Dementsprechend wurden die Heiß-Feucht-Wechselklimawerte in Anlehnung an DICKSON und BENNEH (1973) auf 20/65 und 40/95 festgelegt. Die höchstmögliche relative Luftfeuchtigkeit von 100 % wurde nicht berücksichtigt, da sonst die Schwitzwasserbildung zu stark forciert worden wäre und damit die Regulierung der relativen Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank unmöglich gemacht hätte.

In der Tat verläuft der Tag- und Nacht-Klimawechsel so, daß bei 20°C eine relative Luftfeuchtigkeit von 95 % vorhanden ist und bei erhöhter Temperatur während der Mittagsstunden 40°C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit herrschen. Die Kombination von 20/65 und 40/95 wurde jedoch hier deshalb gewählt, weil dadurch ein starkes Klimagefälle entsteht und somit der Niederschlag von Schwitzwasser begünstigt wird (vgl. DIN 50016).

Auf die Durchführung der Wechselklimalagerung wird in Kapitel 6.2. näher eingegangen.

Eine Freiluftlagerung an Ort und Stelle (hier im tropischen Ghana) hätte den Vorteil, den natürlichen Bewitterungsvorgang beobachten zu können. Dieses Verfahren hat jedoch den Nachteil, daß es sehr zeitaufwendig ist. Es würden Monate bzw. Jahre vergehen, ehe verwertbare Ergebnisse aus diesen Beobachtungen vorlägen. Der Verfasser dieser Arbeit plant jedoch, in Afrika weitere Untersuchungen an freiluftgelagerten Hölzern durchzuführen.

Die Behandlungsarten 40 bis 130 in Tabelle 2 entsprechen einer Behandlung mit kaltem, heißem oder kochendem Wasser (vgl. Tabelle 2 und 3).

Tabelle 2: Art und Dauer der gewählten Klimabeanspruchung

Bezeichnung der Behandlungsart	Behandlungsart
10	7 Tage im Normalklima 20°C und 65% rLF, DIN 50014
20	7 Tage im Normalklima, 30 Tage im tropischen Wechselklima von 20°C/65% relative Luftfeuchte, 40°C/95% relative Luftfeuchte analog Bild 36
30	7 Tage im Normalklima, 30 Tage im tropischen Wechselklima und wieder 7 Tage im Normalklima
40	7 Tage im Normalklima, 1 Tag in kaltem Wasser
50	7 Tage im Normalklima, 1 Tag in kaltem Wasser, 7 Tage im Normalklima
60	7 Tage im Normalklima, 4 Tage in kaltem Wasser
70	7 Tage im Normalklima, 4 Tage in kaltem Wasser, 7 Tage im Normalklima
80	7 Tage im Normalklima, 3 Stunden in heißem Wasser, 2 Stunden in kaltem Wasser
90	7 Tage im Normalklima, 3 Stunden in heißem Wasser, 2 Stunden in kaltem Wasser und wieder 7 Tage im Normalklima
100	7 Tage im Normalklima, 6 Stunden in kochendem Wasser, 2 Stunden in kaltem Wasser
110	7 Tage im Normalklima, 6 Stunden in kochendem Wasser, 2 Stunden in kaltem Wasser und wieder 7 Tage im Normalklima
120	7 Tage im Normalklima, 4 Stunden in kochendem Wasser, 16 Stunden in trockener Luft von 55°C und 20 % relativer Luftfeuchtigkeit, 4 Stunden in kochendem Wasser, 16 Stunden in kaltem Wasser
130	7 Tage im Normalklima, 4 Stunden in kochendem Wasser, 16 Stunden in trockener Luft, 4 Stunden in kochendem Wasser, 16 bis 20 Stunden in kaltem Wasser, 7 Tage im Normalklima
140	18 Tage in tropischem Wechselklima, analog Bild 36 vor der Verleimung

Tabelle 3: Erläuterung zu den in Tabelle 2 genannten
Behandlungsarten

Lagerung	Temperatur ϑ (°C)	rel. Luft- feuchte (%)	Bemerkung
Normalklima	20 ± 2	65 ± 5	geschlossener Raum mit bewegter Luft
heiß-feuchtes Wechselklima (tropisches Wechselklima)	20 40	65 95	Köttermann Klima- schrank mit Wech- selklima
trockene Luft ca.	55 ± 2	20	regulierbarer Trockenschrank
kaltes Wasser	20 ± 1	-	Proben stän- dig von Was- ser bedeckt
heißes Wasser	$76 \pm 0,5$		
kochendes Was- ser	98		das Wasser koch- te ab ca. 98°C

4. Bestimmung der physikalischen Eigenschaften von fehlerfreien Kleinproben

4.1. Probenherstellung

Zur Bestimmung der Rohdichte wurden Proben mit den Abmessungen 2 cm x 2 cm x 3 cm aus gesundem und fehlerfreiem Holz hergestellt. Die Abmessungen wurden mit einer Schieblehre auf $\pm 0,05$ mm genau ermittelt. Die Masse wurde auf 1/1000 g genau ermittelt. Für die Ermittlung der Sorptions- und Quellungseigenschaften wurden unbehandelte fehlerfreie Abachi- und Khayaproben mit den Abmessungen 2 cm x 2 cm x (0,8 cm in Faserrichtung) verwendet. Die Probenentnahme erfolgte repräsentativ über den Bohlenquerschnitt nach dem gleichen Schema wie für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaftswerte (vgl. Bild 20). Weiter wurde noch der Extraktstoffanteil bestimmt, wofür Holzstücke entsprechend zerkleinert wurden.

4.2. Prüfungsverfahren und Versuchsdurchführung

4.2.1. Klimatisierung der Proben

Es wurden die Rohdichte in gedarrtem Zustand (ρ_0) und die Rohdichte nach Klimatisierung bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit (Normalklima) (ρ_{12}) bestimmt. Dazu wurden im ersten Fall 20 Proben je Holzart 24 Stunden lang bei 103 $\pm$ 1°C gedarrt. Im zweiten Fall wurden ebenfalls 20 Proben je Holzart so lange im Normalklima gelagert, bis Gewichtskonstanz eingetreten war (Behandlungsart 10 wie in Tabelle 2); die Holzfeuchtigkeit betrug dabei etwa 12 %.

4.2.2. Rohdichte und Feuchtigkeitsgehalt

Nach der Klimatisierung der Proben wurde deren Masse m und Volumen V bestimmt und sodann die Rohdichte ρ berechnet:

$$\rho = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}} = \frac{m}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1)$$

Um zu verhindern, daß die gedarrten Proben Wasserdampf aus der Luft aufnehmen, war es wichtig, diese vom Ofen direkt in

einem Exsikkator über Phosphorpentoxid zu lagern.

Die Holzfeuchtigkeit u wurde aus der aufgenommenen Wassermenge und dem absoluten Trockengewicht G_o nach der Formel

$$u = \frac{G_u - G_o}{G_o} \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

bestimmt. Dabei bedeuten:

G_u = Gewicht des feuchten Holzes

G_o = Gewicht des Holzes im gedarrten Zustand.

Um die Feuchtigkeitsaufnahme beider Holzarten bei Wasserlagerung zu bestimmen, wurden außerdem noch Probenstücke der Abmessungen 3 cm x 3 cm x 1,5 cm drei Wochen lang unter Wasser bei Raumtemperatur gelagert, wobei die dabei aufgetretene Gewichtszunahme als Funktion der Zeit registriert wurde.

4.2.3. Sorptionseigenschaften

Der Vorgang, daß Holz aus der Atmosphäre Wasserdampf aufnimmt, wird als Adsorption, die Abgabe von Wasserdampf an die Atmosphäre als Desorption bezeichnet. Bei genügend langer Versuchszeit stellt sich in Zuordnung zur relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur der Umgebung im Holz eine Gleichgewichtsfeuchtigkeit ein. Diese ist unterschiedlich, je nachdem, ob die Probe diesen Gleichgewichtszustand bei steigender oder sinkender Feuchtigkeit erreicht (Sorptionshysterese). Zur Aufnahme der Sorptionsschleife bei 20°C wurde die von A. Schneider beschriebene Sorptionsapparatur (Bild 14) verwendet; (KOLLMANN und SCHNEIDER, 1958; SCHNEIDER, 1965).

In jedem der zehn Versuchsgefäße, in denen jeweils die Versuchsproben eingelagert waren, wurde ein anderer relativer Dampfdruck φ mit Hilfe von Schwefelsäure-Wasser-Gemischen bzw. mit verschiedenen gesättigten Salzlösungen aufrechterhalten. Folgende Beträge des relativen Dampfdruckverhältnisses wurden mit den nachstehenden Schwefelsäure-Wasser-Gemischen, gesättigten Salzlösungen bzw. mit Wasser eingestellt:

φ	eingestellt mit	φ	eingestellt mit
7,3%	$\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ -Gemisch	75,9%	NaCl in ges.Lösung
17,0%	$\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ -Gemisch	86,0%	KCl in ges.Lösung
33,8%	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ in ges.Lösung	90,0%	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ in ges.Lösung
43,8%	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ in ges.Lösung	97,6%	K_2SO_4 in ges.Lösung
58,0%	$\text{NaBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ in ges.Lösung	100,0%	H_2O

Nach Einlagerung der Proben in das Versuchsgefäß wurde dieses zusammen mit einem angeschlossenen Gefäß, welches das Mittel zur Dampfdruckeinstellung enthielt, mittels einer zweistufigen Drehschieberpumpe bis auf 10^{-2} mbar Partialdruck der Luft evakuiert. Nach Abschalten der Pumpe stellte sich dann in jedem Probengefäß ein der diesen Mitteln entsprechende Dampfdruck ein.

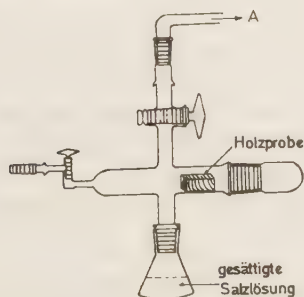


Bild 14: Schematische Darstellung eines Probengefäßes der Versuchsanordnung für Sorptionsmessungen nach A. SCHNEIDER

→ A: Anschluß für weitere Gefäße, Vakuumpumpe und Manometer

Die Versuche wurden bei konstanter Temperatur von 20°C in einem Klimaraum durchgeführt. Nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes (etwa nach 20 Tagen) wurde das Gewicht sowie die tangentielle, radiale und axiale Abmessung für jede Probe ermittelt. Um die Desorptionswerte bestimmen zu können, wurden die Proben zunächst fünf Tage lang zur Befeuchtung über Wasser gelagert und anschließend erneut in die Versuchsgefäße eingelagert.

Mit Hilfe der vor Versuchsbeginn ermittelten Ausgangswerte für den Darrzustand wurden anschließend die Gleichgewichtsbeträge für die jeweilige Holzfeuchtigkeit und Quellung bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 5 und in den Bildern 16 bis 19 dargestellt und werden in Abschnitt 4.4. diskutiert.

4.2.4. Bestimmung der Extraktstoffanteile in Abachi und Khaya

Im Hinblick auf die Verleimbarkeit der Hölzer können Inhaltsstoffe ein großer Störfaktor sein. NARAYANAMURTI, GUPTA und VERMA (1962) fanden z.B., daß Teak und Acacia catechu aufgrund ihres Ölgehaltes und anderer Inhaltsstoffe äußerst schwer zu verleimen sind. KOLLMANN (1955) bestätigte ebenfalls eine erhebliche Verlängerung der Aushärtungszeit bei der Verleimung einiger indischer Holzarten. Es wurden folgende Extraktstoffbestimmungen nach dem Standard der Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI) durchgeführt:

Kaltwasser-Extrakt nach TAPPI-Standard T1m 59

Heißwasser-Extrakt nach TAPPI-Standard T1m 59

Äthanol-Benzol-Extrakt nach TAPPI-Standard T6m 59
und T12m 59.

Kaltwasser-Extrakt:

2 g luftgetrocknetes Holz wurden nach Ermittlung des absoluten Trockengewichtes mit 200 ml destilliertem Wasser versetzt

und bei 25°C unter gelegentlichem Umrühren 48 Stunden lang stehen gelassen. Zur Bestimmung des Extraktstoffgehaltes wurde der gelöste Anteil eingedampft, bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und ausgewogen.

Heißwasser-Extrakt:

Hier wurden 2 g lufttrockenes Holz mit 100 ml destilliertem Wasser 3 Stunden lang im Rückflußkühler gekocht. Danach wurde der Extraktgehalt, wie beim Kaltwasser-Extrakt, aus dem gelösten Anteil ermittelt.

Äthanol-Benzol-Extrakt:

Die Extraktion erfolgte 4 Stunden lang in einem Gemisch aus 95 %igem Äthanol und Benzol (Gewichtsverhältnis 1:2). Danach wurde die Extraktion weitere 4 Stunden in 95 %igem Äthanol in einer Soxhlet-Apparatur durchgeführt. Der Extraktgehalt wurde, ebenso wie beim Kaltwasser-Extrakt, aus dem gelösten Anteil ermittelt.

4.3. Versuchsergebnisse

4.3.1. Rohdichte und Sorptionseigenschaften

Die im Verlauf dieser Versuchsreihe festgestellten Werte der Rohdichte sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Die Ergebnisse wurden mit denen anderer Forscher oder Forschungsinstitute verglichen (LE CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL, 1960; KNIGGE und SCHULZ, 1966; FARMER, 1972).

Die ermittelten Werte für die Rohdichte ρ_0 und ρ_{12} des Versuchsmaterials sind in guter Übereinstimmung mit den aus der Literatur bekannten Werten.

Tabelle 4: Ergebnisse der Rohdichtennmessungen an Abachi- und Khayaholz

Holzart	A B A C H I						K H A Y A					
	min ρ g/cm ³	mitte ρ g/cm ³	max ρ g/cm ³	s g/cm ³	Vx %	n	min ρ g/cm ³	mitte ρ g/cm ³	max ρ g/cm ³	s g/cm ³	Vx %	n
Eigenschaft												
Rohdichte im Darrzustand ρ_0	0,26	0,38	0,44	0,04	10,5	20	0,52	0,56	0,61	0,03	5,4	20
Rohdichte im Normalklima $\rho_{\sim 12}$	0,29	0,42	0,47	0,04	9,7	20	0,56	0,60	0,66	0,03	5,0	20
Rohdichte $\rho_{\sim 12}$ von verblautem Abachiholz	0,39	0,41	0,46	0,03	7,1	20						
ρ_0	0,35 (KN, SCH) 0,34 bis 0,54 (FA)						0,54 (FA)					
$\rho_{\sim 12}$	0,37 bis 0,50 (CTFT) 0,42 bis 0,54 (FA)						0,46 bis 0,70 (CTFT)					

Es bedeuten: KN, SCH nach KNIGGE und SCHULZ, CTFT nach CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL,
FA nach FARMER

s = Standardabweichung

Vx = Variationskoeffizient

n = Anzahl der untersuchten Proben

$\rho_{\sim 12}$ = Rohdichte der Holzproben im Gleichgewicht mit 20°C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit

Die Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Tauchzeit, ausgedrückt in absoluter Gewichtszunahme, zeigt Bild 15.

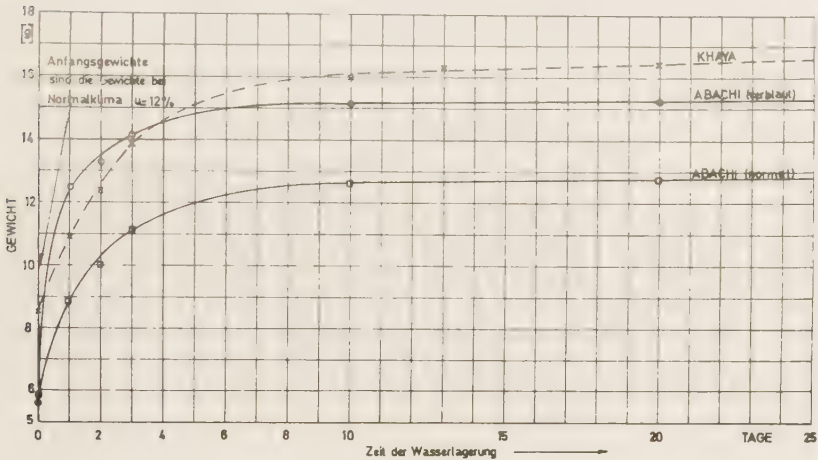


Bild 15: Wasseraufnahmefähigkeit von Abachi und Khaya

Die unter 4.2.3. beschriebenen Sorptions- und Quellungsmessungen ergaben die in Tabelle 5 zusammengestellten Ergebnisse. Die daraus entstandenen Kurven für das Sorptionsverhalten zeigen Bild 16 und 17.

Die Mittelwerte der Adsorption und Desorption bei den relativen Dampfdrücken von 8,2 % und 18,6 % im rechten Teil der Tabelle entstehen durch Bildung des Mittelwertes aus den Adsorptionswerten, bei den relativen Dampfdrücken von 7,3 % und 17,0 % und den Desorptionswerten bei den relativen Dampfdrücken von 9,0 % und 18,6 %. Ab dem relativen Dampfdruck von 33,6 % wurden Adsorptions- sowie Desorptionswerte bei gleichem relativem Dampfdruck gemessen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Sorptions- und Quellungsmessungen bei 20° C an Abachi- und Khayaholz

a) Holzart: A B A C H I

rel. Dampfdruck %	ADSORPTION					DESORPTION					MITTELWERTE				
	u _{Holz} %	α_t	α_r	α_a	α_v	u _{Holz} %	α_t	α_r	α_a	α_v	u _{Holz} %	α_t	α_r	α_a	α_v
7,3	2,69	0,63	0,62	0,25	1,50										
9,0						3,72	0,71	0,46	0,29	1,47					
(8,2)											3,2	0,67	0,54	0,27	1,48
17,0	4,16	0,90	0,79	0,17	1,86										
19,2						5,55	1,16	0,74	0,25	2,16					
(18,6)											4,9	1,03	0,76	0,21	2,01
33,8	6,52	1,37	1,29	0,25	2,84	8,09	1,72	1,18	0,46	3,40	7,3	1,54	1,19	0,35	3,12
43,8	9,97	2,47	1,46	0,34	4,30	11,09	2,69	1,44	0,38	4,56	10,5	2,58	1,45	0,36	4,43
58,0	10,67	2,59	1,70	0,34	4,68	11,62	2,78	1,60	0,59	5,03	11,1	2,68	1,65	0,47	4,86
75,9	14,09	3,58	2,17	0,63	6,51	17,32	4,44	2,51	1,01	8,16	15,7	4,01	2,34	0,82	7,33
86,0	17,11	4,40	2,45	0,80	7,81	20,38	5,25	2,91	1,05	9,46	18,7	4,82	2,68	0,93	8,64
90,0	16,65	4,54	2,55	0,67	7,92	20,81	5,32	2,89	0,92	9,30	19,2	4,93	2,72	0,79	8,64
97,6	25,48	6,45	3,33	1,09	11,21	25,96	6,39	3,18	0,96	10,84	25,7	6,42	3,26	1,03	11,02
100	29,18	8,80	3,33	1,19	11,65	35,82	6,74	3,31	1,22	11,03	32,5	6,77	3,32	1,21	11,64

b) Holzart: K H A Y A

rel. Dampfdruck %	ADSORPTION					DESORPTION					MITTELWERTE				
	u _{Holz} %	α_t	α_r	α_a	α_v	u _{Holz} %	α_t	α_r	α_a	α_v	u _{Holz} %	α_t	α_r	α_a	α_v
7,3	2,70	0,69	0,61	0,08	1,39										
9,0						3,89	0,86	0,67	0,08	1,63					
(8,2)											3,3	0,78	0,64	0,08	1,51
17,0	4,37	1,16	0,97	0,08	2,15										
19,2						5,98	1,39	1,12	0,13	2,60					
(18,6)											5,2	1,28	1,04	0,11	2,40
33,8	6,98	1,74	1,42	0,08	3,27	8,67	2,37	1,66	0,17	3,90	7,8	2,06	1,54	0,13	3,56
43,8	10,40	2,64	2,36	0,21	5,28	11,55	2,81	2,50	0,21	5,60	11,0	2,72	2,43	0,21	5,44
58,0	11,07	2,81	2,37	0,25	5,51	11,97	2,81	2,32	0,25	5,46	11,5	2,81	2,34	0,25	5,48
75,9	14,37	3,70	3,15	0,42	7,41	17,68	4,95	3,77	0,54	9,50	16,0	4,32	3,46	0,48	8,46
86,0	17,29	4,57	3,77	0,42	8,96	20,26	5,71	4,31	0,59	10,81	18,8	5,14	4,04	0,51	9,88
90,0	17,75	4,93	3,82	0,38	9,37	20,61	5,83	4,40	0,50	11,05	19,2	5,38	4,11	0,44	10,21
97,6	25,28	6,92	5,09	0,75	13,21	28,72	6,92	4,96	0,67	12,97	25,5	6,92	5,02	0,71	13,05
100	28,54	7,49	5,16	0,79	13,94	29,82	7,53	5,09	0,79	13,90	29,2	7,51	5,12	0,79	13,92

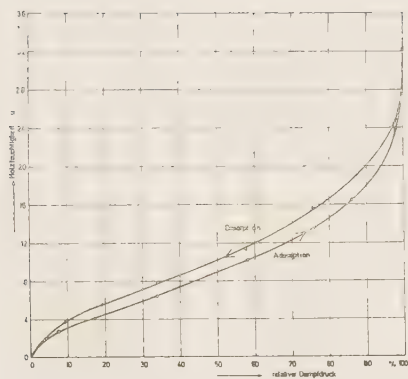


Bild 16: Sorptionsschleife bei 20°C für Abachi

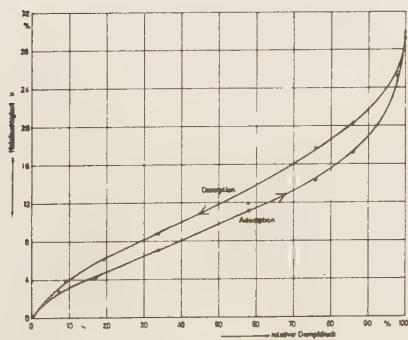


Bild 17: Sorptionsschleife bei 20°C für Khaya

In Bild 18 und Bild 19 sind die Quellungskurven der Holzarten Abachi und Khaya dargestellt. Die Quellungswerte $\alpha_t, \alpha_r, \alpha_a$ und α_v sind auf den Darrzustand bezogen. Sie sind ein Maß für die Längenänderungen in tangentialer, radialer und axialer Richtung sowie für die Volumenänderung des Holzes, wenn die Feuchtigkeit vom Darrzustand bis zu einem bestimmten Betrag der Ausgleichsfeuchtigkeit ansteigt.

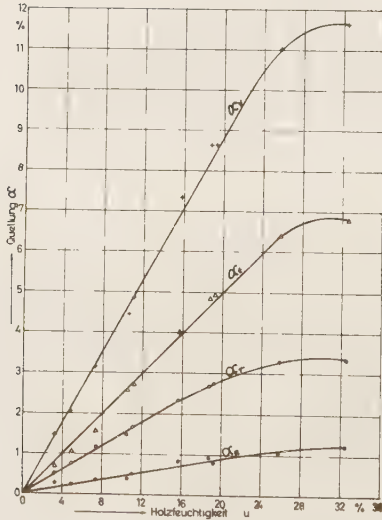


Bild 18: Kurve der Quellungskoeffizienten von Abachi

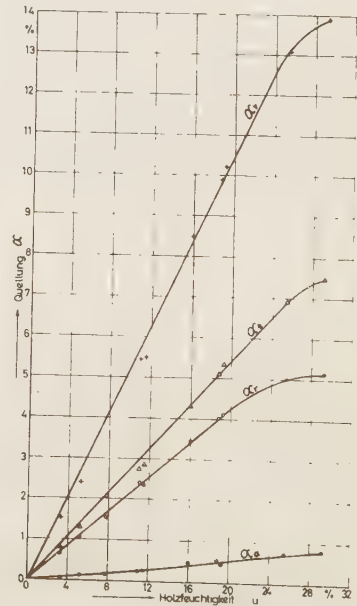


Bild 19: Kurve der Quellungskoeffizienten von Khaya

Die Quellungswerte wurden nach der folgenden Beziehung berechnet:

$$\alpha_x = \frac{x_u - x_0}{x_0} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

Es bedeuten:

α_x = Quellungswert

x_0 = Länge bzw. Volumen im Darrzustand

x_u = Länge bzw. Volumen bei jeweiliger Ausgleichsfeuchtigkeit.

Die mittleren Quellungswerte in den verschiedenen Richtungen, bei der 100 % relativem Dampfdruck entsprechenden Holzfeuchtigkeit (siehe Tabelle 5), standen in folgendem Verhältnis zueinander:

$$\text{Abachi: } \alpha_a : \alpha_r : \alpha_t : \alpha_v = 1:2,74:5,59:9,62$$

$$\text{Khaya: } \alpha_a : \alpha_r : \alpha_t : \alpha_v = 1:6,48:9,51:17,62$$

Aus Gleichung 3 folgt für die Längenänderung l_u vom Darrzustand u_0 bis zum jeweiligen Feuchtigkeitszustand u

$$l_u = \left(1 + \frac{\alpha_u}{100} \right) \cdot l_0 \quad (4)$$

Daraus kann eine Beziehung hergeleitet werden, womit man aus Bild 18 und 19 für einen Zustand 2 die Länge l_{u2} bei der Quellung α_{u2} ermitteln kann, wenn die Werte l_{u1} und α_{u1} des Ausgangszustandes 1 bekannt sind.

Es ergibt sich mit α_u :

$$l_{u2} = l_{u1} \cdot \left[\frac{100 + \alpha_{u2}}{100 + \alpha_{u1}} \right] \quad (5)$$

4.3.2. Extraktstoffanteile

Die Ergebnisse der nach 4.2.4. durchgeführten Extraktstoff-
anteilbestimmung sind in Tabelle 6 dargestellt

Tabelle 6: Prozentuale Anteile der Kaltwasser-, Heißwasser-
und Äthanol-Benzol-Extrakte

Parameter	Holzart			
	Abachi	Khaya	Fichte*	Buche**
Kaltwasser-Extrakt (TAPPI-Standard T _{1m} 59)	3,47 %	3,70 %	1,0 %	0,64 %
Heißwasser-Extrakt (TAPPI-Standard T _{1m} 59)	4,06 %	5,02 %	2,0 %	- -
Äthanol-Benzol-Extrakt (TAPPI-Standard T _{6m} 59) T _{12m} 59	2,67 %	4,17 %	2,0 %	1,24 %

* Vergleichswerte nach FENGEL (1966, 1967, 1970)

** Vergleichswerte nach SCHARKOW (1939, 1948)

Aufgrund des sehr hohen prozentualen Anteils an akzessorischen Bestandteilen der beiden tropischen Holzarten wurde zunächst befürchtet, daß eine Verleimung dieser Hölzer schwierig sei. Beide Holzarten waren jedoch gut verleimbar, wie die Prüfung der Bindefestigkeit ergab (vgl. 6.4.).

4.4. Diskussion der Versuchsergebnisse

Abachi mit der mittleren Darrdichte $\rho_0 = 0,38 \text{ g/cm}^3$ kann als mäßig leichtes Holz, Khaya dagegen mit $\rho_0 = 0,56 \text{ g/cm}^3$ als mittelschweres Holz bezeichnet werden. Die Maximalwerte der Rohdichte (vgl. Tab. 4) waren gegenüber den Minimalwerten bei Abachi um 69 % bei ρ_0 und um 62 % bei ρ_{12} höher, bei Khaya dagegen betrugen die entsprechenden Werte in beiden Fällen nur ca. 17 %.

Die bestimmte mittlere Rohdichte ρ_0 von Abachi ist von gleichem Betrag wie die Rohdichte von Strobe und Küstentanne, während ρ_0 von Khaya mit der von Castanea und amerikanischem Mahagoni verglichen werden kann.

Innerhalb von drei Tagen nach Einlagerung der Proben in Wasser nahm Abachi um etwa 83 % des Ursprungsgewichtes zu. Bei verblautem Abachi betrug die Gewichtszunahme nach drei Tagen sogar 133 %. Mit 65 % war die Zunahme bei Khaya vergleichsweise am geringsten. Aus Bild 15 ist zu entnehmen, daß die Wasseraufnahme bei Abachi nach etwa 10-tägiger Lagerung nahezu beendet war. Die Endfeuchte nach 20-tägiger Wasserlagerung betrug bei Khaya 116 %, bei Abachi 147 % und bei verblautem Abachi 204 %. Die Wasseraufnahme geht also bei Abachi viel schneller vor sich als bei Khaya.

Abachi und Khaya zeigen die für Holz typische Sorptionsschleife (Bild 16 und 17). Zu Beginn der Sorption bei einem relativen Dampfdruck von etwa 10 % zeigen beide Holzarten zunächst einen steilen Anstieg der Holzfeuchtigkeit, der aber dann bei zunehmendem Dampfdruck wieder flacher wird; jedoch ist ab etwa 60 % relativem Dampfdruck wieder ein zunehmend steiler werdender Anstieg der Sorptionsisothermen zu beobachten.

Wie man beim Vergleich der beiden Isothermen von Abachi und Khaya feststellen kann, zeigt Khaya bei mittleren relativen Dampfdrücken zwar einen etwas steileren Verlauf als Abachi, insgesamt aber weist Khaya ein etwas schwächeres Sorptionsvermögen als Abachi auf. Der Fasersättigungspunkt liegt für Khaya bei ca. 30 % Holzfeuchtigkeit, während er bei Abachi auf ca. 32 % Holzfeuchtigkeit ansteigt.

Aus den Ergebnissen der Quellungsmessungen (Tabelle 5, Bild 16 und 19) ist festzustellen, daß die Quellung in tangentialer Richtung bei Abachi etwa doppelt so hoch ist wie in radialer Richtung (5,59 : 2,74 bei 100 % rel.Dampfdruck). Bei Khaya dagegen ist das tangentielle Quellmaß nur etwa um 47 % höher als das radiale (9,51 : 6,48 bei 100 % rel.Dampfdruck).

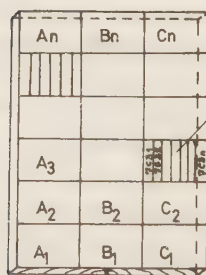
5. Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von fehlerfreien Kleinproben

5.1. Probenherstellung

Im Jahre 1919 schlug der Franzose MONIN vor, die Größe der für Experimente zu verwendenden Querschnitte der fehlerfreien Kleinproben für Biege- und Druckversuche einheitlich auf 20 mm x 20 mm festzulegen. Diese Maße entsprechen den DIN-Normen.

Ein Überschreiten dieser Querschnittsfläche läßt eine Auswirkung auf die Festigkeit erwarten. Diese Feststellung wurde von Forschern wie BAUMANN (1952), CASATI (1931) und auch von Wissenschaftlern des BRITISH FOREST PRODUCTS LABORATORY (1939) getroffen und durch entsprechende Versuche erhärtet. Für die Untersuchungen in vorliegender Arbeit wurden demzufolge die Querschnittsabmessungen von 20 mm x 20 mm zugrunde gelegt.

Die Herstellung der Proben erfolgte in der Werkstatt des Institutes für Holzforschung, wobei folgendes Entnahmeschema verwendet wurde:



Beispiel für die Bezeichnung einer Probe:

I 7C₃⁴

dabei bedeutet:

I = Block Nr. 1 (KHAYA)

7 = Bohle Nr. 7

C = rechtes Drittel der Bohle

3 = 3. Reihe von unten (jede Reihe ca. 50 cm bis 60 cm hoch)

4 = Probe kommt aus dem 4. Abschnitt der Reihe (von links nach rechts gehend), wobei jeder Abschnitt ca. 5 cm bis 6 cm breit ist.

Bild 20: Entnahmeschema der fehlerfreien Kleinproben

Die Proben entstammen sowohl Kern- als auch Splintholz-zonen. Da Faserabweichungen bei Khaya deutlich zu verzeichnen waren, wurde darauf geachtet, die Proben in Längsrichtung zur Holzfaser und unter Berücksichtigung der Zuwachszonen zu schneiden.

Nach Aufteilung der Bohlen in die Komponenten A, B und C wurden diese weiter in $A_1, A_2 \dots A_n$ bzw. $B_1, B_2 \dots B_n, C_1, C_2 \dots C_n$ von ca. 50 cm bis 60 cm Höhe unterteilt.

Eine weitere Unterteilung erfolgte wie in Bild 20 angegeben.

Bei Riftbrettern, Bild 21, wurde das gleiche Aufteilungsprinzip verwendet. Der Zuschnitt der den Seitenbrettern entnommenen Proben geschah unter Beachtung des senkrechten Verlaufes der Zuwachszonen (Bild 21).

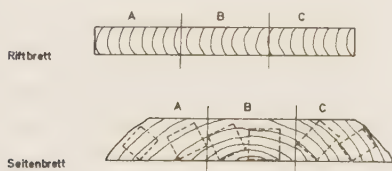


Bild 21: Probenentnahme aus Rift- und Seitenbrettern

Als erstes wurden Rohlinge herausgeschnitten, die gegenüber dem geforderten endgültigen Probenkörpermaß Übermaße von + 6 mm bis 10 mm in radialer, tangentialer und in Längsrichtung aufwiesen.

Damit eine Bearbeitung an der Hobelmaschine möglich war, war die Länge der Rohlinge größer als die der fertigen Proben.

Die zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften benötigten fehlerfreien Kleinproben wurden überwiegend in Anlehnung an die DIN-Normen hergestellt. Lediglich die Form der Zugproben entsprach nicht der in DIN 52188 festgestellten Form. Zugproben bestehen aus einem prismatischen Teil, in dem der Bruch verlaufen soll und zwei Einspannköpfen, deren Querschnittsfläche größer als die des prismatischen Teils ist. Es ist bis jetzt nicht gelungen, eine Zug-Probenform zu finden, die sich für alle Holzarten eignet und bei der die ganze Bruchzone im Sollbruchbereich liegt. Es ist bekannt, daß bei der Zugprobe nach DIN 52188 (Bild 22B) im Übergangsbereich zwischen prismatischem Teil und Einspannkopf Kerbspannungen auftreten, die zum Versagen der Proben in dieser Zone führen können. Um den Bruch in dieser unerwünschten Zone zu verhindern, wird eine Probenform mit den größeren Abrundungsradien von 713 mm und einem Probenquerschnitt von $1,2 \text{ cm}^2$ im Institut für Holzforschung der Universität München verwendet, deren Normung vorgesehen ist (Bild 22A). Infolge der geringen Schub- und Querdruckfestigkeit des Holzes war es schwierig, eine Befestigung des Zugstabes in der Prüfmaschine derart zu erzielen, daß ein Bruch im Bereich des Einspannkopfes vermieden wurde. Es wurden deshalb Hirnholzstücke angeleimt, die den Druck der Einspannkeile soweit aufnehmen, daß Beschädigungen des Kopfes verhindert werden. Die mechanischen Probleme, die beim Einspannen solcher Zugproben in die Spannkeile der Prüfmaschine entstehen, wurden von KUFNER (1963) behandelt.

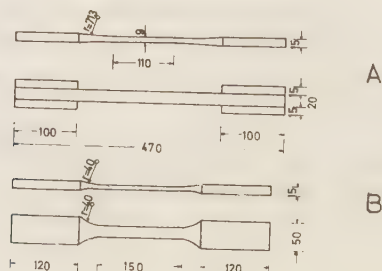


Bild 22: A: Form und Abmessung der für den Zugversuch verwendeten Proben
 B: Probenform nach DIN 52188
 Maß in mm

Als Leim für die Anleimer wurde Kauresinleim 440 verwendet. Bei den Vorversuchen wurde festgestellt, daß die Köpfe dieser Probenform aus den beiden tropischen Harthölzern Khaya und Abachi noch nicht ausreichend fest waren, da trotz des guten Leimes immer wieder der Einspannkopf abriß. Zur Abhilfe wurde dann der Einspannkopf mit 0,6 dicken Buchenfurnierplatten verstärkt. Auf diese Weise gelang es in allen Fällen, einwandfreie Ergebnisse zu erzielen.

Die Herstellung orientierter Proben bereitete bei den Abachi-Bohlen keine Schwierigkeiten, nur wies das Abachi-Holz teilweise Befall von Bläuepilzen auf. Der Einfluß dieser Verblauung auf die Druckfestigkeit wurde untersucht (vgl. 5.4.2. und 5.5.1.).

Anders bei Khaya. Hier ergaben sich infolge der Drehwüchsigkeit Schwierigkeiten, die Proben im geraden Faserverlauf zuzuschneiden. Dies führte zu dem Entschluß, die Proben senkrecht und parallel zum Verlauf der Zuwachszonen zu schneiden, um bei Biege- und Scherfestigkeit sowie Bruchschlagarbeit Belastungen sowohl radial als auch tangential zu den Zuwachszonen durchführen zu können (Bild 23). Damit sollte die Möglichkeit geschaffen werden, die Werte beider Richtungen zu vergleichen.

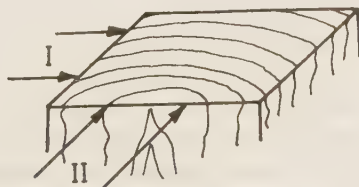


Bild 23: Schema der Schnitt- bzw. Belastungsrichtung

- I = Belastung tangential zu den Zuwachszonen:
Die hier entstandenen Festigkeiten sind in dieser Arbeit als $\parallel$ bezeichnet.
- II = Belastung radial zu den Zuwachszonen:
Die hier entstandenen Festigkeiten sind in dieser Arbeit als $\perp$ bezeichnet.

5.3. Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

5.3.1. Allgemeines

Im Institut für Holzforschung der Universität München stand für die Prüfung der kleinen fehlerfreien Proben, neben einer hydraulisch angetriebenen Universalprüfmaschine UHP 10 der Losenhausen-Maschinenbau AG, eine elektronische Universalprüfmaschine zur Verfügung. Diese Maschine wird von der INSTRON corp. gebaut. Sie besitzt ein Kraftmeßsystem mit Kraftmeßdosen für Zug und Druck, die mit Dehnungsmeßstreifen bestückt sind. Die statischen Festigkeiten wurden teils an der Instron-Maschine und teils an der UHP 10 Universalprüfmaschine geprüft. Die dynamische Schlagbiegefestigkeit dagegen wurde an einem Pendelschlagwerk der Firma Mohr & Federhaff, Mannheim, mit 150 J maximaler Arbeitsleistung bei einem Auflageabstand von 24 cm durchgeführt.

5.3.2. Druckfestigkeit (σ_D)

(Probenform nach DIN 52185, Bild 24, Nr.2)

Die Druckversuche erfolgten nach DIN 52185, Blatt 1, "Druckversuche in Faserrichtung". Hiernach wurden die in Bild 24, Nr.2, abgebildeten kleinen fehlerfreien prismatischen Proben mit den Abmessungen 2 x 2 x 3 (cm) aus Abachi und Khaya geprüft. Die Beanspruchung erfolgte parallel zur Längsrichtung der Proben, die bei Khaya wegen der Drehwüchsigkeit dieser Holzart zuweilen etwas von der Faserrichtung abwich.

100 Proben je Holzart wurden hergestellt. Davon wurden 20 Proben je Holzart acht Wochen lang über Wasser gelagert, so daß die Proben einer Atmosphäre mit 100 % relativer Luftfeuchtigkeit ausgesetzt waren. 20 weitere Proben wurden unter $103 \pm 1^\circ\text{C}$ gedarrt. Die restlichen 60 Proben je Holzart wurden acht Wochen lang im Klimaraum bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert, so daß diese bei der Prüfung eine Feuchtigkeit von 12 % bis 14 % besaßen. Um Vergleichswerte hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens von Hölzern mit unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten zu bekommen, wurde die Bestimmung der Druckfestigkeit bei drei verschiedenen

Werten für den Feuchtigkeitsgehalt durchgeführt (siehe Tabelle 9).

Wie bereits erwähnt, waren bei Abachi die Bohlen, aus denen die Proben geschnitten wurden, teilweise verblaut. Da zunächst damit gerechnet wurde, daß die durch Pilzbefall verursachte Färbung die Festigkeit des Holzes verändern könnte, wurden die Proben nach Möglichkeit so herausgeschnitten, daß sie keinerlei Blaufärbung aufwiesen. Um den Einfluß der Verfärbung auf die Festigkeit zu prüfen, wurde auch eine Serie von Druckproben aus verblautem Holz hergestellt und ebenfalls im Klimaraum gelagert.

Der Versuch wurde mit der UHP 10 durchgeführt; als Belastungsgeschwindigkeit wurde ca. 40 N/mm^2 je min. gewählt. Bei diesem Wert war ungefähr nach einer Minute Belastungssteigerung der Bruch zu erwarten. Über die Ergebnisse der Versuche wird unter 5.4.2. berichtet.

5.3.3. Zugfestigkeit (σ_z)

(Probenform nach Institutsvorschlag, Bild 22A)

Entsprechend der allgemeinen Prüfvorschrift für Längszugbeanspruchung wurden die nach dem Institutsvorschlag hergestellten Proben - siehe Bild 22A - nach dem Klimatisieren mit einem Feuchtigkeitsgehalt von ca. 12 % in der Instron-Universalprüfmaschine bis zu ca. $1/3$ der Bruchlast belastet, um die elastische Dehnung (Dehnung vor Erreichen der Elastizitätsgrenze) festzustellen. Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Prüfraum entsprachen dem Normalklima von 20°C und 65 % rLF. Die Stabköpfe wurden in den Einspannvorrichtungen der Prüfmaschine mit Hilfe von Beißkeilen befestigt. Die Proben wurden also bei der Prüfung durch die Beißkeile quer zur Stabrichtung gepreßt und die Zugkräfte durch Ausnützung des Reibungswiderstandes zwischen Probe und Beißkeilen in die Probe eingeleitet. Um eine exzentrische Beanspruchung zu vermeiden, ist beim Einspannen der Proben äußerste Sorgfalt geboten. Die Steigerung der Belastung wird bei der Instron-Universalprüfmaschine vollkommen gleichmäßig gesteuert. Mittels Wechselrädern

im Antrieb der Maschine konnte man den Querhauptvorschub und damit auch die Belastungsgeschwindigkeit genau festlegen. Hier wurde ein Querhauptvorschub von 0,3 cm/min gewählt. Dieser entsprach in etwa dem in DIN 52188 vorgeschlagenen Wert von $(600 \text{ kp/cm}^2) \approx 60 \text{ N/mm}^2$ je Minute.

Vor Beginn der Prüfung wurde der Querschnitt des mittleren Stabteils A_0 mit der Schieblehre ermittelt, um später die Zugfestigkeit $\sigma_z = \max F/A_0$ bestimmen zu können.

Mit Hilfe von zwei Dehnungsmeßbügeln, auf denen Dehnungsmeßstreifen zu einer Vollbrücke geschaltet waren, konnte die Dehnung und damit der Zug-E-Modul gemessen werden.

Die Eichung der Dehnungsmeßbügel erfolgte täglich vor Beginn der Versuche mit einem Kalibrator der Firma Huggenberger.

Im Vorversuch ergab sich eine Bruchfestigkeit von $\sigma_z \approx 80 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ bei Abachi und $\sigma_z \approx 100 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ bei Khaya. Als Anhaltspunkt für eine überschlägige Festlegung der Elastizitätsgrenze wurde dann jeweils $\sigma_z/3$ angenommen.

Nach Bestimmung der elastischen Dehnung durch Belastung der Proben bis zur Elastizitätsgrenze $\sigma_z/3$ auf der Instron-Maschine wurde die Zugfestigkeit der Proben auf der UHP 10 ermittelt. Das Überwechseln auf die UHP 10 wurde deshalb notwendig, da der Belastungsweg auf der Instron-Maschine für die lange Zug-Probe (470 mm) nicht mehr ausreichte, um die Probe zu Bruch zu bringen.

5.3.4. Biegefestigkeit und Biege-E-Modul (σ_B und E_B)

(Probenform nach DIN 52186, Bild 24, Nr.1)

Biegefestigkeit und Biege-E-Modul wurden in einem Versuch bestimmt, wobei der E-Modul mit den Durchbiegungen aus dem linearen Bereich des Arbeitsdiagrammes errechnet wurde (Bild 29).

Die Prüfung erfolgte in der Instron-Universalprüfmaschine, nachdem die Proben 6 Wochen lang bei Normalklima klimatisiert worden waren. Nach DIN 52186, Ziff.41, sieht die Versuchsanordnung vor, daß die Proben als freiliegende Träger auf zwei Auflagern geprüft und in der Mitte der Stützweite mit einer Einzelkraft belastet werden. Zwischen Druckstempel und Probenstab wird ein Reiter aus Stahl mit gerundeten Kanten eingelegt, um Eindrücke durch den Stempel zu vermeiden.

Wichtig ist das Verhältnis Stützweite L_s zur Stabhöhe h . BAUMANN (1922) stellte am Beispiel von Lindenholz fest, daß die Biegefestigkeit geringer wird, je kleiner der Abstand der Auflagern im Verhältnis zur Stabhöhe ist, weil bei einem kleinen Verhältnis L_s/h mit einem Einfluß der Schubspannung zu rechnen ist. Erst ab $L_s/h = 15$ ändern sich die Festigkeitswerte kaum noch.

So legt auch die DIN-Norm als Stützweite $L_s = 15 \cdot h$ fest. In den USA und in Großbritannien wird mit noch größerem Verhältnis L_s/h gearbeitet, in Frankreich und in der Sowjet-Union dagegen mit $L_s/h = 12$.

Als Belastungsgeschwindigkeit wurde eine Spannungszunahme von 50 N/mm^2 in der Minute gewählt, was in ungefähr einer Minute zum Bruch führte.

Eine Schreibvorrichtung an der Instron-Prüfmaschine zeichnete eine Belastungs-Durchbiegungskurve auf, die als Arbeitslinie bezeichnet wird.

Unter der Voraussetzung linear elastischen Verhaltens eines Werkstoffes kann der Biege-E-Modul für den in Bild 24 Nr.1 dargestellten Lastfall nach der Formel

$$E_B = \frac{\Delta F \cdot L_s^3}{48 \cdot \Delta f \cdot I} \quad (6)$$

errechnet werden.

Es bedeuten:

$$\begin{aligned} \Delta F &= \text{gewählte Laststufe} = (F_1 - F_0) \text{ (N)} \\ L_s &= \text{Auflagerentfernung (Stützweite) (mm)} \\ \Delta f &= \text{Durchbiegung, die zur Laststufe } \Delta F \text{ gehört} \\ I &= \text{Trägheitsmoment des Rechteckquerschnittes} \\ &= \frac{b \cdot h^3}{12} \text{ (mm}^4\text{)}. \end{aligned}$$

Die Biegefestigkeit ergibt sich unter denselben Voraussetzungen bei dem hier vorhandenen quadratischen Querschnitt nach der Formel

$$\sigma_B = \frac{3 \cdot \max F_B \cdot L_s}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (7)$$

Es bedeuten:

$$\begin{aligned} \max F_B &= \text{Bruchlast (N)} \\ h &= \text{Probenhöhe (20 mm)} \\ b &= \text{Probenbreite (20 mm)}. \end{aligned}$$

5.3.5. Scherfestigkeit (τ_s)

(Probenform nach DIN 52187, Bild 24, Nr.4 und 5)

Die Bestimmung der Scherfestigkeit kann an einschnittigen oder zweischnittigen Proben erfolgen. Der einschnittige Scherkörper ist in den USA genormt, der zweischnittige in DIN 52187. Er wird als Kreuzscherprobe bezeichnet. Mit der Kreuzscherprobe wird die Scherfestigkeit nur in Faserrichtung bestimmt. Da die Scherfestigkeit von der Orientierung des Faserverlaufs in der Scherfläche abhängt und in den untersuchten Hölzern Faserabweichungen vorkommen, wurden zweierlei Proben hergestellt; bei der einen Sorte lagen die beiden Scherflächen tangential zu den Zuwachszonen, bei der anderen radial dazu. Bei Kreuzscherproben nach DIN 52187 betrugen die Abmessungen jeder Scherfläche 40 mm x 40 mm, so daß beide Scher-

flächen insgesamt 32 cm^2 groß waren. Zur Berechnung der Scherfestigkeit wurden die tatsächlichen, mit der Schieblehre an jeder Probe gemessenen Abmessungen zugrunde gelegt und die Scherfestigkeit nach der Formel

$$\tau_{SK} = \frac{F_{SK}}{A_0} = \frac{F_{SK}}{b(l_1 + l_2)} \quad \text{bestimmt.}$$

Es bedeuten: F_{SK} = Bruchlast (N)
 b = Breite der Scherfläche (mm)
 $l_1 = l_2$ = Länge der Scherflächen (mm)

Geprüft wurde auf der Universalprüfmaschine UHP 10. Die Steigerung der Belastungsgeschwindigkeit betrug etwa 6 N/mm^2 pro Minute, der Feuchtigkeitsgehalt der Proben etwa 12 %.

Neben Kreuzscherproben wurde auch ein anderer zweischnittiger Scherkörper in Form von Rundscherkörpern nach DIN 52187 (Bild 24, Nr.5) hergestellt. Mit diesen Proben wurde die Scherfestigkeit quer zur Faser geprüft.

5.3.6. Spaltfestigkeit (σ_s)

(Probenform nach Bild 24, Nr.6 - französische Norm)

Die Ermittlung der Spaltfestigkeit erscheint wichtig, da überall, wo Nägel ohne Vorbohren in Holz eingeschlagen werden, die Gefahr des Spaltens besteht. In Deutschland ist die Prüfung der Spaltfestigkeit jedoch nicht genormt, wohl aber in England, den USA und in Frankreich. Für die vorliegende Prüfung wurde die französische Norm gewählt (Bild 24, Nr.6). Geprüft wird durch eine Zugkraft, die über zwei Nuten senkrecht zur Längsachse des Probenkörpers eingeleitet wird. Die Abmessungen der Spaltfläche A_s wurde bei jeder Probe mit der Schieblehre gemessen. Die Spaltfestigkeit wird zu $\sigma_s = F_s/A_s$ berechnet und stellt nur eine Vergleichsspannung dar, da hier in Wirklichkeit eine Kerbspannung auftritt. $A_s = 20 \cdot 25 = 500 \text{ mm}^2$ (vgl. Bild 24, Nr.6).

5.3.7. Bruchschlagarbeit (a_0)

(Probenform nach DIN 52189, Bild 24, Nr.7)

Bei Hölzern, aus denen Fahrzeuge, Brücken, Türme, Leitern und Werkzeuge hergestellt werden, spielt die Festigkeit bei

schlagartiger Biegebeanspruchung eine wichtige Rolle. Die Versuche wurden nach DIN 52189 durchgeführt, wobei die rechnerische Stützweite 24 cm bei einem lichten Abstand der Auflager von 21 cm beträgt (Bild 24, Nr.7). Die Probe wird vom Pendelhammer mit einem einzigen Schlag zerstört. Die zum Durchschlagen benötigte Schlagarbeit kann von einem Schleppzeiger direkt abgelesen werden. Die Bruchschlagarbeit a_0 berechnet sich zu $a_0 = \text{Schlagarbeit} : \text{Probenquerschnitt} \text{ (kJ/m}^2\text{)}$.

Die Länge der Proben betrug 30 cm bei einem quadratischen Querschnitt von 2 cm Kantenlänge. Die Proben wurden sowohl tangential (nach DIN 52189) als auch radial zu den Zuwachszonen vom Pendelhammer zerschlagen.

5.4. Versuchsergebnisse

5.4.1. Allgemeines

Tabelle 7 zeigt die gesamten Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften der fehlerfreien Kleinproben. Bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse wurde von einer Unterscheidung zwischen den verschiedenen Stämmen abgesehen, weil die Anzahl der vorhandenen Stämme zu gering war (je zwei Abachi- und Khaya-Stämme).

Für die Auswertung der Versuche wurden statistische Verfahren angewendet. Dabei wurden die Proben aus jeder Holzart als aus einer Grundgesamtheit stammend betrachtet.

Es wurden folgende Formeln zugrunde gelegt:

Aus n Einzelwerten x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) wird der Mittelwert $\bar{x}$ berechnet nach

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

Das Streuungsmaß = (Standardabweichung s) wird durch Wurzelziehen des Streuungsquadrats $s^2 = (\text{Varianz})$ erhalten

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \text{ mit } n > 1 \quad (9)$$

Aus (8) und (9) ergibt sich der Variationskoeffizient (relative Schwankung der Einzelwerte um ihren Mittelwert) V_x zu

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (10)$$

Tabelle 7: Ergebnisse der Prüfung von mechanischen Eigenschaftswerten fehlerfreier Kleinproben nach Klimatisierung im Normalklima ($u \sim 12\%$) (Bzgl. der Symbole $\parallel$ und $\perp$ vgl. Bild 23)

HOLZART	n	ABACHI			KHAYA		
		$\bar{x}$ (N/mm ²)	$\frac{s}{N/mm^2}$	V_x (%)	$\bar{x}$ (N/mm ²)	s (N/mm ²)	V_x (%)
Eigenschaft bei $u \sim 12\%$							
Druckfestigkeit σ_D	60	35,8	2,54	7,1	48,4	3,61	7,5
Druckfestigkeit von verblautem Abachi σ_D	21	34,4	1,29	3,7			
Zugfestigkeit σ_Z	50	79,0	16,6	21,0	97,4	19,1	19,6
Zug-E-Modul E_Z	50	9100	1328	14,6	12500	1690	13,5
Biegefestigkeit σ_{BH} σ_{BT}	30 30	59,9 } 66,0 }	5,2 5,8	8,7 } 8,0 }	79,6 } 87,9 }	9,1 6,2	11,4 } 7,1 }
Biege-E-Modul E_B $\parallel$ $\perp$	30 30	6800 } 6900 }	724 906	10,7 13,1	9800 } 10900 }	1416 907	14,5 8,3
Kreuzscherfestigkeit τ_{SK} $\parallel$ $\perp$	30 30	4,71 } 4,8 }	0,39 0,93	8,3 19,4	9,7 } 7,3 }	1,33 1,18	13,7 } 16,1 }
Rundscherfestigkeit τ_{SR}	30	22,7	2,67	11,8	36,4	5,17	14,2
Spaltfestigkeit σ_S	40	0,45	0,06	13,3	0,94	0,11	11,7
Bruchschlagarbeit a_0 $\parallel$ $\perp$	30 30	kJ/m^2 41 } 54 }	kJ/m^2 6,8 12,1	16,6 22,4	kJ/m^2 56 } 51 }	kJ/m^2 12,2 7,7	21,8 15,1

5.4.2. Druckfestigkeit

Wie aus Tabelle 8 ersichtlich ist, wurden folgende Druckfestigkeitswerte ermittelt.

Tabelle 8: Druckfestigkeiten fehlerfreier Kleinproben

	$\min \sigma_D$ (N/mm ²) (nach Lagerung im Normalklima)	mittel σ_D (N/mm ²)	$\max \sigma_D$ (N/mm ²)	bei einer Rohdichte ρ_{12} (g/cm ³)
ABACHI (gesund)	29,8	35,8	41,9	0,42
ABACHI (mit Bläuepilz)	32,7	34,4	37,4	0,41
KHAYA	40,6	48,4	56,1	0,60

Beim Bruch der Proben konnten zwei Erscheinungen beobachtet werden:

- 1) Der Bruch erfolgte entweder sehr plötzlich, wobei sich Bruchformen wie in Bild 25 und Bild 26 ergaben, nämlich:

Scherflächen 25a) und 26a), die den ganzen Probenkörper schräg durchziehen

oder

Spaltebenen 25b) und 26b)

oder auch

Gleitebenen 25c) und 26c)
mit einem Winkel von ca. 15° bis 20° gegen die Waagrechte.
- 2) Das Holz wurde langsam zusammengestaucht, wobei nach Überschreiten der Bruchgrenze, welche infolge geringen Spannungsabfalles nicht deutlich erkennbar war, eine vorübergehende Spannungszunahme aufgrund des in der gestauchten Zone auftre-

tenden Verdichtungsdruckes beobachtet werden konnte. Bild 25d) und 26d) zeigen die hier entstandenen Bruchformen.

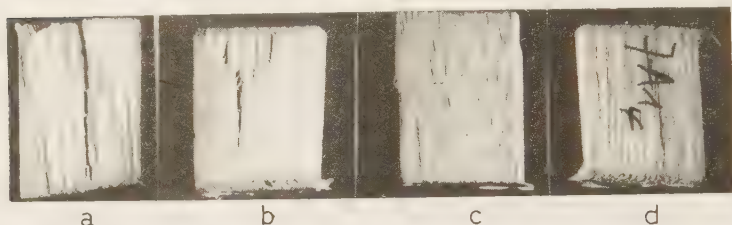


Bild 25: Bruchformen bei Druckversuchen an ABACHI

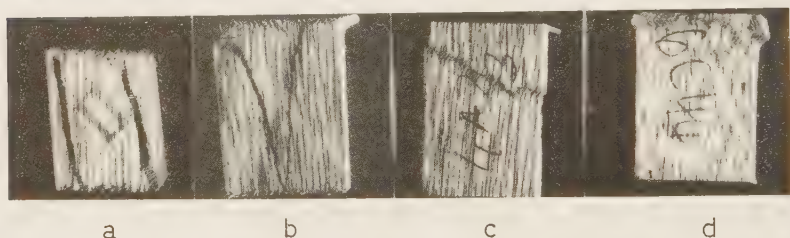


Bild 26: Bruchformen bei Druckversuchen an KHAYA

Wie unter 5.3.2. berichtet, wurde außerdem noch an verblauten Abachi-Proben geprüft, ob zwischen verblautem und gesundem Abachiholz ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Festigkeit besteht.

Die durchgeführten Druckfestigkeitsversuche ergaben folgende Ergebnisse:

gesunde Proben	bläuebefallene Proben
$\sigma_{D_1}(\text{mittel}) = 35,8 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	$\sigma_{D_2}(\text{mittel}) = 34,4 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
$\rho_1 = 0,42 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\rho_2 = 0,41 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

Zwischen den beiden Mittelwerten besteht eine Abweichung von nur $1,4 \text{ N/mm}^2$, d.h., die verblauten Proben waren ca. 3,9 % schlechter als die gesunden Proben. Diese Unterschiede liegen im Streubereich beider Probenkollektive.

Außer der Prüfung der Druckfestigkeit von normalklimatisierten Druckproben (Feuchtigkeitsgehalt ca. 12 %), wurden auch Proben, die über Wasser gelagert (Feuchtigkeitsgehalt ca. 29 %) sowie Proben, die bei $103 \pm 1^\circ\text{C}$ gedarrt wurden, geprüft, um den Feuchtigkeitseinfluß vergleichen zu können. Aus Tabelle 9 ist der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Festigkeit des Holzes zu erkennen.

Tabelle 9: Vergleich der Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Holzfeuchtigkeitszuständen

Holzart	A B A C H I					K H A Y A				
	u %	$\bar{x}$ (N/mm ²)	s (N/mm ²)	Vx %	n	u %	$\bar{x}$ (N/mm ²)	s (N/mm ²)	Vx %	n
σ_D	Darr	52,3	7,25	13,9	20	Darr	65,7	7,79	11,8	20
σ_{DW}	12	35,8	2,54	7,1	60	12	48,4	3,61	7,5	60
σ_{DW}	29	23,4	2,59	11,1	20	26	31,4	3,08	9,7	20

σ_D = Druckfestigkeit

σ_{DN} = σ_D im Normalklima

σ_{DW} = σ_D über Wasser gelagert

σ_{DI} = σ_D in gedarrtem Zustand

Ein weiterer Punkt, der bei der Auswertung der Druckfestigkeit in Betracht gezogen werden mußte, war die Korrelation zwischen der Rohdichte und der Druckfestigkeit (vgl. dazu 3.2.1.).

5.4.3. Zugfestigkeit

Aus nachfolgender Tabelle 10 können die ermittelten minimalen, mittleren und maximalen Werte der Längszugfestigkeiten der beiden Holzarten entnommen werden (siehe auch Tabelle 7).

Tabelle 10: Zugfestigkeiten von Abachi und Khaya

	$\min \sigma_z$ (N/mm ²)	mittel σ_z (N/mm ²)	$\max \sigma_z$ (N/mm ²)
Abachi	45,7	79,0	117,4
Khaya	44,5	97,4	131,3

Auch bei dieser Festigkeitsprüfung bildeten sich zwei Bruchformen heraus, eine langfaserige und eine kurzfaserige. Beide Bruchformen waren bei Proben aus ein und demselben Stamm festzustellen.

Bild 27 und 28 stellen die aufgetretenen Bruchformen dar. Nach einer genauen Betrachtung der Bruchformen war festzustellen, daß bei den kurzfaserig gebrochenen Proben (Bild 28) der Faserverlauf von einer drehwüchsigeren Natur war, als bei Proben mit langfaserigen Brüchen.

Allerdings ließ sich aus den Bruchbildern die Größe der Drehwüchsigkeit nicht eindeutig abschätzen, denn in beiden Fällen waren annähernd die gleichen Werte für die Zugfestigkeit festzustellen.

Die aus den Zugfestigkeitsprüfungen ermittelten Werte für den Elastizitätsmodul sind auch aus Tabelle 7 zu entnehmen.

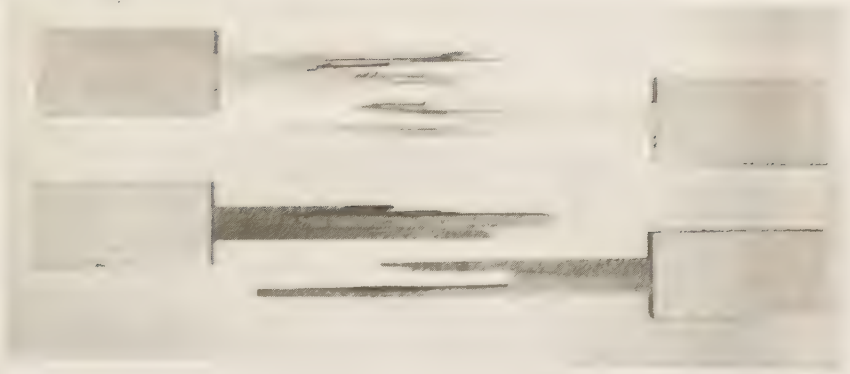


Bild 27: langfaserige Bruchformen beim Zugversuch
 oben: Abachi unten: Khaya

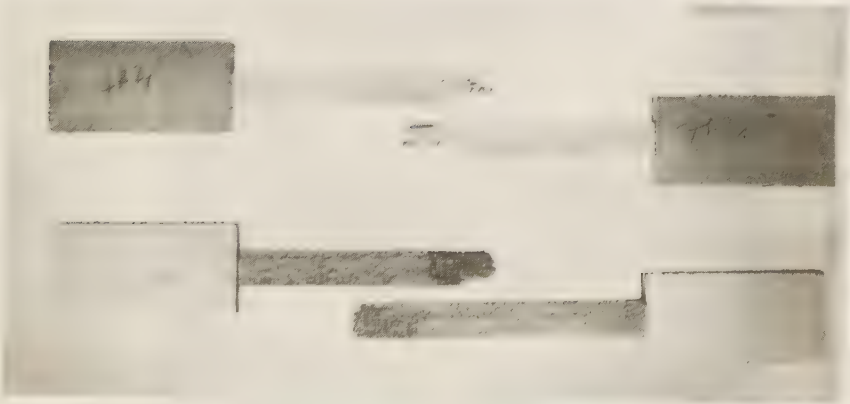


Bild 28: kurzfaserige Bruchformen beim Zugversuch
 oben: Abachi unten: Khaya

5.4.4. Biegefestigkeit und Biege-E-Modul

Die durchschnittlichen Biegefestigkeiten und Biege-E-Moduli für die Belastung nach Bild 24, Nr.1 zeigt Tabelle 11.

Tabelle 11: durchschnittliche Biegebeanspruchungen $\sigma_{||}$ und $\sigma_{\perp}$ sowie Biege-E-Modul E_B (für die Belastungsrichtungen $\parallel$ und $\perp$ vgl. Bild 23)

Holzarten	σ_B (N/mm ²) bei Belastungsrichtung zur Zuwachszone		Biege-E-Modul (N/mm ²)	
	tangential $\parallel$	radial $\perp$	tangential $\parallel$	radial $\perp$
Abachi	59,9	66,0	6800	6900
Khaya	79,6	87,9	9800	10900

Zwei durch das Registriergerät der Instron aufgezeichnete Belastungs-Durchbiegediagramme zeigt Bild 29. Dieses stellt ein typisches Arbeitsdiagramm dar, welches für beide Holzarten Gültigkeit hat. Die durch den Biegeversuch entstandenen Bruchbilder sind aus den Bildern 30 bis 33 erkennbar und unter 5.5.3. diskutiert.

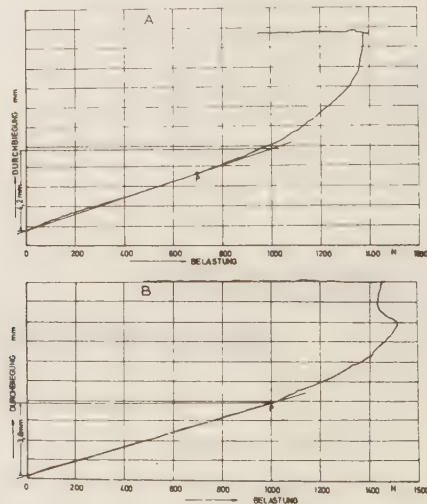


Bild 29: Beispiel für ein Belastungs-Durchbiegediagramm von Khaya-Holz mit A) Belastungsrichtung $\parallel$ und B) $\perp$ zu den Zuwachszone
(Reproduktion der Aufzeichnung der Instron-Prüfmaschine)

Drei Arten von Bruchbildern waren typisch
 Bruchbild 1 (Bild 30,31), Bruchbild 2 (Bild 32) und
 Bruchbild 3 (Bild 33)

Bruchbild 1

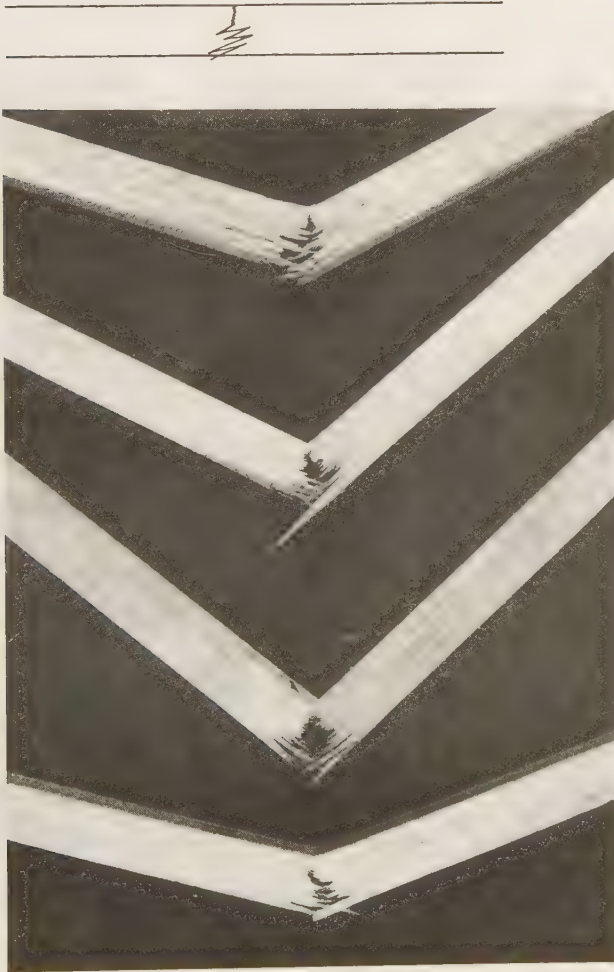
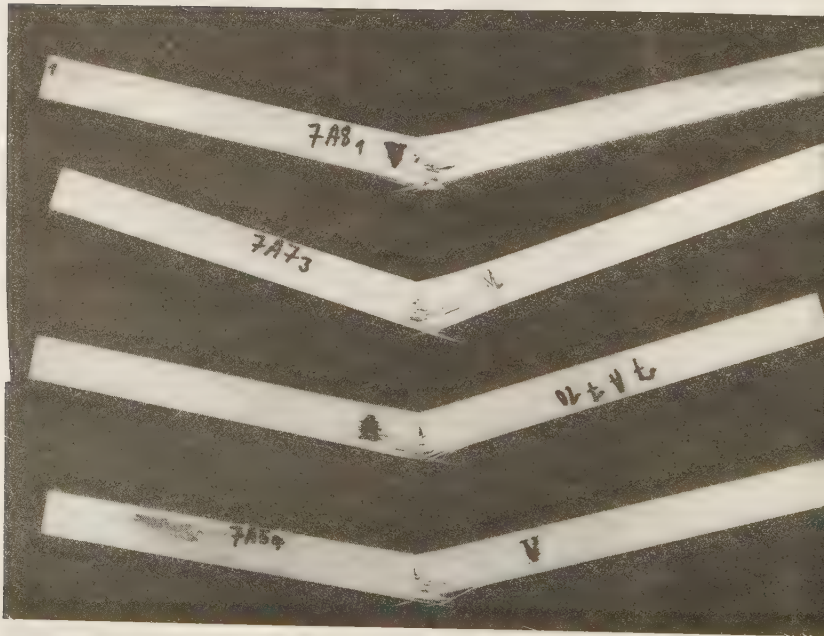
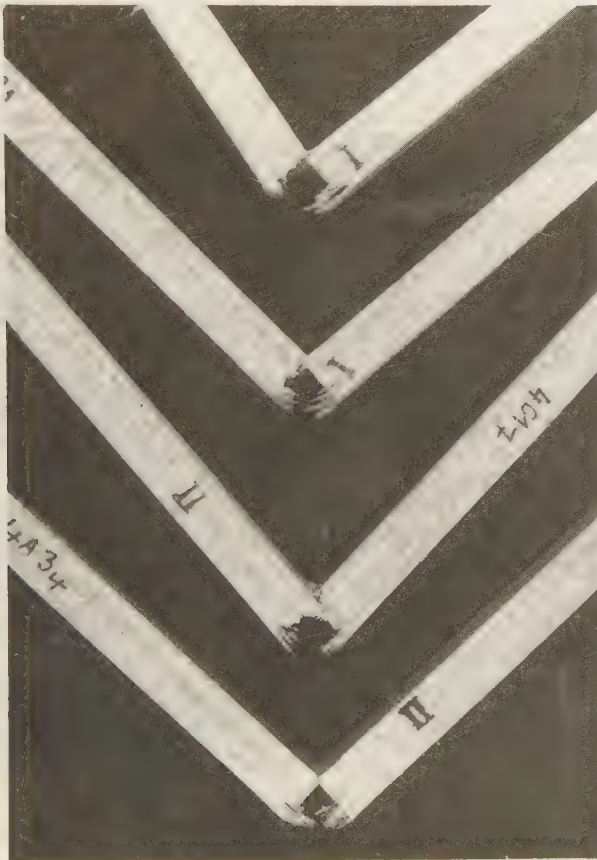


Bild 30: Bruchbild bei $\frac{1}{4}$ belasteten Khaya-Proben
 Dieses Bruchbild war fast bei allen Khaya- und
 Abachi-Proben, die tangential zu den Zuwachszonen
 belastet wurden, zu sehen.

Bruchbild 1

Bild 31: Bruchbild bei $\parallel$ belasteten Abachi-Proben

Bruchbild 2

Bild 32: Bruchbild bei $\perp$ -belasteten Khaya-Proben

Die Bruchform der radial belasteten Proben von Khaya war kurzsplitterig und zeigte bei fast allen Proben das gleiche Bild. Beachtenswert ist die auftretende relativ gerade Bruchfläche.

Bruchbild 3

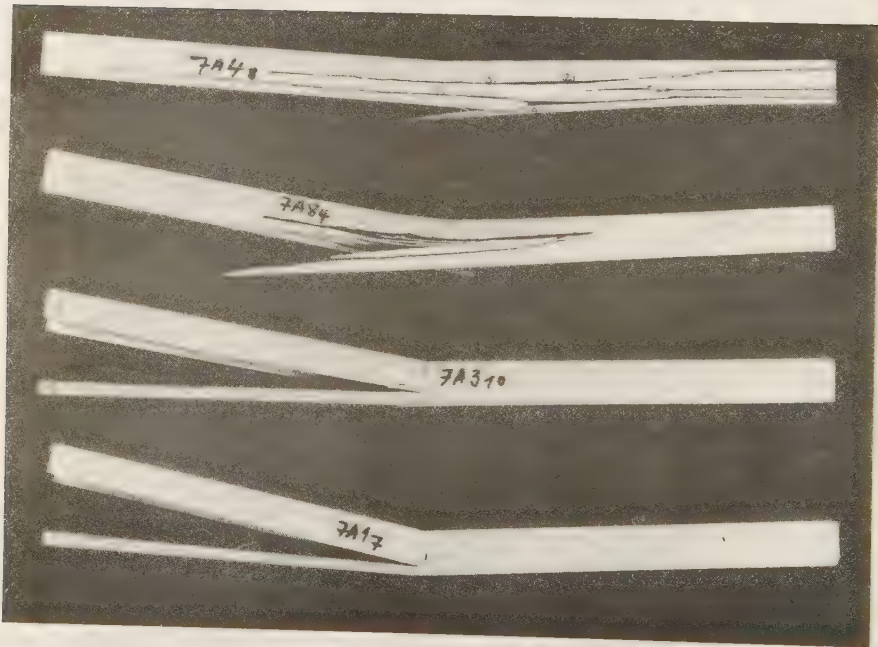
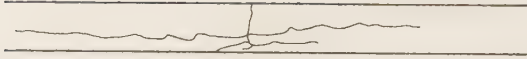


Bild 33: Bruchbild bei $\perp$ -belasteten Abachi-Proben.

Bei den radial belasteten Abachi-Proben konnte fast durchwegs die Bildung von radial verlaufenden Rissen beiderseits der Bruchzone und entlang der Zuwachsringgrenze beobachtet werden.

5.4.5. Scherfestigkeit

Die Kreuzscherfestigkeit bei Abachi war längs der radialen sowie der tangentialen Fläche fast gleich. Mit einem Durchschnittswert von $4,7 \text{ N/mm}^2$ liegt dieser etwa in der für Linden- und Erlenholz bekannten Größenordnung (vgl. KNIGGE u. SCHLUZ, 1966). Bei Khaya kann die Kreuzscherfestigkeit von $9,6 \text{ N/mm}^2$ längs der Tangentialfläche als hoch und längs der Radialfläche mit $7,3 \text{ N/mm}^2$ als mäßig hoch angesehen werden.

Die während der Belastung auftretenden Querkzugsspannungen verursachten bei fast allen tangential belasteten Khaya-Proben ein Einreißen der Proben an der unteren Seite parallel zu den Scherflächen (Bild 34). Dies deutet darauf hin, daß die Querkzugfestigkeit überschritten wurde.

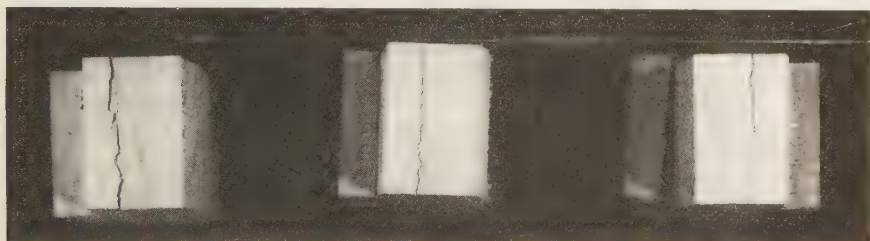


Bild 34: Abreißen von Khaya-Proben, belastet in tangentialer Richtung (11)

Bei radial belasteten Khaya-Proben sowie bei allen Abachi-proben wurden keine derartigen Risse festgestellt.

Die Werte der Rundscherfestigkeit bei Abachi ($22,7 \text{ N/mm}^2$) und bei Khaya ($36,4 \text{ N/mm}^2$) betragen mehr als das Vierfache der Kreuzscherfestigkeit.

5.4.6. Spaltfestigkeit

Die Spaltfestigkeit von Abachi ist, im ganzen gesehen nicht groß, lediglich $0,45 \text{ N/mm}^2$ im Durchschnitt. Der Wert von

Khaya betrug ca. das Zweifache von Abachi, im Mittel $0,94 \text{ N/mm}^2$. Zum Vergleich liegt nach KNIGGE/SCHULZ die Spaltfestigkeit von Kiefer bei $0,74 \text{ N/mm}^2$ und von Fichte bei $0,37 \text{ N/mm}^2$. Die sehr schwere tropische Holzart Bongossi hat dagegen eine Spaltfestigkeit von $6,0 \text{ N/mm}^2$.

5.4.7. Bruchschlagarbeit

Die Bruchschlagarbeiten können etwa mit denen von Teak verglichen werden, wobei die Werte von Abachi ein wenig darunter und die von Khaya etwas darüber liegen können. KNIGGE und SCHULZ (1966) geben für Abachi den Wert von 46 kJ/m^2 und 45 kJ/m^2 für Mahagoni-Swietenia an.

Die hier gefundenen Werte betrugen für Abachi 41 kJ/m^2 in Richtung tangential zu den Zuwachszonen und 54 kJ/m^2 in Richtung radial zu den Zuwachszonen und für Khaya 56 kJ/m^2 in tangentialer Richtung und 51 kJ/m^2 in radialer Richtung. Ähnlich wie beim statischen Biegeversuch bildeten sich auch bei der dynamischen Biegeprüfung die typischen Quer- sowie Längsrisse aus.

5.5. Diskussion der Versuchsergebnisse

5.5.1. Druckfestigkeit

Die mittlere Druckfestigkeit von Abachi ist nicht sehr groß. Mit $35,8 \text{ N/mm}^2$ entspricht sie ungefähr den für Küstentanne oder Strobe bekannten Werten. Der für Khaya festgestellte Mittelwert von $48,4 \text{ N/mm}^2$ liegt ungefähr zwischen den Werten von Douglasie und echtem Mahagoni oder Castanea (vgl. KNIGGE u. SCHULZ, 1966).

Die ermittelten Grenzwerte der Druckfestigkeiten beider Holzarten liegen bei

Abachi: $\min \sigma_D = 29,8 \text{ N/mm}^2$ und $\max \sigma_D = 41,9 \text{ N/mm}^2$
und bei

Khaya : $\min \sigma_D = 40,6 \text{ N/mm}^2$ und $\max \sigma_D = 56,1 \text{ N/mm}^2$.
Dies bedeutet bei Abachi eine Streubreite von ca. 41 %
und bei Khaya eine solche von 38 % des Mindestwertes.

Eine genaue Definition, warum verschiedene Bruch-Erscheinungen, wie diese in Bild 25 und Bild 26 auftreten, nämlich das Spal-

ten der Proben (Bild 25a,b u. Bild 26a,b) oder das Abgleiten der Prismenteile gegeneinander (Bild 25c u. Bild 26c) oder das Stauchen der Proben in Bild 25d und Bild 26d, ist schwer zu geben. Bei den hier aufgetretenen Erscheinungen kann nur vermutet werden, daß die verschiedenen Bruchformen durch unterschiedliche Fasersteifigkeiten und Querkzugfestigkeiten innerhalb der einzelnen Proben hervorgerufen wurden. Nach Erreichen der Bruchgrenze platzten die Proben in den Fällen a) und b) (Bild 25 u. 26) infolge geringerer Querkzugfestigkeit auseinander, während die Proben in Fall d) wohl aufgrund einer etwas höheren Faserbiegsamkeit an der Auflagerfläche umknickten und sich dabei stauchten. Dazwischen liegt der Fall c), bei dem sich eine Gleitebene bildete.

Über den Einfluß der Bläuepilze auf die Druckfestigkeit des untersuchten Abachiholzes ist aufgrund der Versuche (vgl. 5.4.2.) festzustellen, daß der Druckfestigkeitsunterschied von nur 3,9 % bei einem Rohdichtenunterschied von $0,01 \text{ g/cm}^3$ zuungunsten des verblauten Holzes als unbedeutend angesehen werden kann und bei einer statistischen Sicherheit von 95 % nicht signifikant war. THUNELL (1952) fand bei der Druckfestigkeit von verblautem Kiefernholz einen Festigkeitsabfall von 7,7 %. Untersuchungen von v. PECHMANN und Mitarbeitern (1964) an verblautem Kiefernholz ergaben ebenfalls, daß die Festigkeitsverluste infolge Bläuepilzbefall nicht bedeutsam sind. Lediglich bei der Bruchschlagarbeit war bei THUNELL und ebenso bei v. PECHMANN ein deutlicher Festigkeitsabfall festzustellen.

Bläuepilze werden häufig, z.B. bei Kiefer und Fichte, nur als eine Farbänderung betrachtet, nicht jedoch als Anzeichen für eine Minderung der statischen Festigkeit gewertet, solange die Zellwände vom Pilz nicht angegriffen werden.

5.5.2. Zugfestigkeit

Die Längszugfestigkeit von Abachi ist mit einem Mittelwert von $79,0 \text{ N/mm}^2$, verglichen mit anderen Holzarten, nicht groß, die von Khaya mit $97,5 \text{ N/mm}^2$ etwa mittelgroß (vgl. KNIGGE u. SCHULZ, 1966). Die Streuung beträgt bei Abachi ca. 157 % und bei Khaya etwa 105 % des Mindestwertes. Wie aus den Bildern 27 und 28 zu ersehen ist, traten auch hier langfaserige und kurzfaserige Brüche auf. Unterschiede zwischen den Festigkeiten langfaserig und kurzfaserig gebrochener Proben konnten nicht festgestellt werden, so daß Aussagen darüber, ob zwischen Bruchformen und Festigkeit der Proben ein gewisses Verhältnis besteht, nicht gemacht werden können.

5.5.3. Biegefestigkeit und Biege-E-Modul

Die durchschnittliche Biegefestigkeit von Abachi mit $\sigma_{B_{\parallel}} = 59,9 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{B_{\perp}} = 66,0 \text{ N/mm}^2$ gilt als mäßig fest (vgl. andere Holzarten, KNIGGE u. SCHULZ). In beiden Belastungsrichtungen betragen die Höchstwerte etwa 135 % der Mindestwerte. Khaya ist mit den Mittelwerten von $\sigma_{B_{\parallel}} = 79,6 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{B_{\perp}} = 87,9 \text{ N/mm}^2$ Abachi gegenüber etwas fester. Seine Höchstwerte betragen etwa 150 % des Mindestwertes.

Besonders zu unterscheiden sind die Belastungsrichtungen, d.h.

- 1) tangential zu den Zuwachszonen, entsprechend
Richtung I = $\parallel$
- 2) radial zu den Zuwachszonen, entsprechend
Richtung II = $\perp$
(siehe Bild 23)

Bei den Khaya-Proben wurden in beiden Belastungsrichtungen überwiegend Brüche im Biegezugbereich verzeichnet, während bei den Abachi-Proben eine Mischung zwischen Biegezug- und Biegeschubbrüchen auftrat.

Bemerkenswert sind die verschiedenen Bruchformen, die je nach Holzart und Belastungsrichtung zustande kamen (Bild 30 bis 33). Bei fast allen Khayaproben, die in Richtung $\perp$

zu den Zuwachszonen belastet werden, traten die Brüche sehr plötzlich auf und zeigten kurzsplitterige, bis kurz vor dem Zugzonenrand senkrecht verlaufende Bruchformen.

Bei den Khaya-Proben mit Beanspruchung $\parallel$ zu den Zuwachszonen trat eine Mischung von kurz- und langsplitterigen Brüchen auf. Die im allgemeinen kurzfasrigen Brüche bei Khaya mit Beanspruchung $\perp$ zu den Zuwachszonen können auf die drehwüchsige Natur dieses Holzes zurückgeführt werden.

Besonders interessant ist - weil fast bei allen Abachi-Proben beobachtet - das Auftreten von längssplitterigen Brüchen in beiden Belastungsrichtungen. Bei den in tangentialer Richtung belasteten Abachi-Proben traten überwiegend Biegezugbrüche auf. Bei Proben, bei denen jedoch die Belastung $\perp$ zu den Zuwachszonen erfolgte, traten überwiegend Biegeschubbrüche auf, wobei sich die Proben oft entlang der Zuwachszonen spalteten (Bild 33). Dies deutet darauf hin, daß die Ebenen der Zuwachszonen Schwachstellen bilden, welche dann während der Biegebelastung bei liegenden Zuwachszonen durch die auftretenden Schubkräfte leichter zu überwinden sind.

Als Beispiel sind in Bild 29 zwei Belastungs-Durchbiegungsdiagramme von Khayaholz dargestellt. In Biegerichtung I, d.h. Belastung $\parallel$ zu den Zuwachszonen, ergibt sich eine Bruchfestigkeit von $78,8 \text{ N/mm}^2$; diese liegt niedriger als bei der $\perp$ zu den Zuwachszonen belasteten Biegerichtung II mit einer Bruchfestigkeit von $84,4 \text{ N/mm}^2$. Der Mittelwert der Festigkeiten aller in $\perp$ Richtung belasteten Abachi-Proben lag um ca. 10,2 % über den $\parallel$ belasteten Proben, bei Khaya liegt die mittlere Erhöhung bei 10,4 %. Man ersieht daraus, daß auch die Belastungsrichtung eine Rolle spielt, was auf die anisotropen Eigenschaften des untersuchten Holzes zurückgeführt werden muß.

Aus dem Verlauf der Arbeitsdiagramme (Bild 29) ist noch zu erkennen, daß nach Überschreiten der Proportionalitätsgrenze die Belastung noch das 1 1/2- bis 2-fache des Wertes der an der Proportionalitätsgrenze auftretenden Biegespannung an-

nehmen kann, bevor die Bruchgrenze erreicht wird. Die Durchbiegungen an der Bruchgrenze waren in allen Fällen etwa 3 bis 4 mal so groß wie an der Proportionalitätsgrenze.

Erwähnenswert ist auch, daß sich die Höchstlast bei fast allen Proben erst kurz vor Erreichen des schlagartig einsetzenden Bruches durch kleine Geräusche erkennen ließ. Demzufolge mußten die Proben sich innerlich bis zur Bruchgrenze verformt haben und dann plötzlich, bei ganz geringem Lastzuwachs, zum Bruch gekommen sein. Diese Erscheinung spricht dafür, daß die Hölzer von ziemlich spröder Beschaffenheit sind. Bei den Abachi-Proben konnte eine ziemlich starke Durchbiegung beobachtet werden, bevor sie plötzlich und schlagartig zu Bruch gingen.

Aus der Tatsache, daß der Biege-E-Modul bei Abachi mit 6800 bis 6900 N/mm² verhältnismäßig klein, der von Khaya mit ~ 10 000 N/mm² als mäßig groß bezeichnet werden kann, ergibt sich, daß Khayaholz eine wesentlich größere Biegesteifigkeit besitzt als Abachi.

5.5.4. Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit längs der Tangential- ($\tau_{s\parallel}$) und Radialflächen ($\tau_{s\perp}$) ist bei Abachi ausgeglichen; die entsprechenden Zahlenwerte betrugen 4,7 N/mm² bzw. 4,8 N/mm². Diese Werte sind, verglichen mit Werten anderer tropischer Holzarten, gering. Anders stellten sich jedoch die Werte bei Khaya dar; hier ergaben sich $\tau_{s\parallel} = 9,7$ N/mm² sowie $\tau_{s\perp} = 7,3$ N/mm².

5.5.5. Bruchschlagarbeit

Als mäßig hoch sind auch die Werte der Bruchschlagarbeit (oder Schlagbiegefestigkeit) beider Holzarten zu bezeichnen. Mit 41 kJ/m² $\parallel$ und 54 kJ/m² $\perp$ für Abachi und 56 kJ/m² $\parallel$ bzw. 51 kJ/m² $\perp$ für Khaya entsprechen beide Holzarten ungefähr den bei Fichte bekannten Werten. Die Bruchformen sind hier weniger splitterig als bei der statischen Biegefestigkeitsprüfung. Dies lag wohl an der dynamischen Art der Belastung.

6. Bestimmung der Bindefestigkeit von verleimten fehlerfreien Kleinproben

6.1. Probenherstellung

Für diesen Versuch wurden Platten in den Abmessungen von etwa $25 \times 50 \text{ cm}^2$ und 5 mm Dicke mit geradefaserigen Abschnitten und etwa stehenden Zuwachszonen vorbereitet. Im Normalklima stellt sich eine Ausgleichsfeuchte von ca. 12 % ein. Danach erfolgte die Verleimung je zwei solcher Abschnitte, und zwar einmal mit Kauresin 440 und einmal mit Kaurit 220.

Bei der Verleimung, die bei Zimmertemperatur geschah, wurde besonderes Augenmerk darauf gelegt, daß der Druck der Presse gleichmäßig verteilt war.

Der Verlauf der Zuwachszonen der Platten stand zwischen 60° und 90° zu den zu verleimenden Flächen. Die Brettabschnitte wurden lediglich gehobelt, da dies erfahrungsgemäß die beste Verleimung gewährleistet.

Verleimung mit Kauresin:

Hier wurden 100 Gewichtsanteile Kauresin 440 zusammen mit 20 Gewichtsanteilen BASF-Kauresin-Härter 444 bei einer Mischtemperatur von ca. 20°C (Topfzeit ca. 3h) gemischt. Als Topfzeit (Gebrauchsdauer) wird die Zeitspanne verstanden, die zwischen der Herstellung der Leimmischung und dem Zeitpunkt liegt, von dem ab der Leimansatz sich nicht mehr auftragen läßt. Bei Überschreitung der Topfzeit ist mit einer Verminderung der Leimfestigkeit zu rechnen. Das Mischen wurde mit einem kleinen Elektro-Mischer mit einem veränderlichen Drehzahlbereich von 50 bis 1400 U/min. vorgenommen, und zwar so lange, bis die Substanz homogen und zähflüssig war. Für das Auftragen des Leimes wurden ca. 10 min. benötigt, eine Zeit, die weit unter der Topfzeit lag.

Es wurde mit einer Leimauftragsmenge von 200 bis 300 g/m^2 ge-

arbeitet (vgl. KOLLMANN, 1955, Tafel VI). In einem weiteren Arbeitsgang wurde dann der Kauresin-Leim auf die eine Brettseite aufgetragen, nach Ablauf der "offenen Wartezeit", etwa 10 min., setzte der Abbindevorgang ein, worauf die mit Leim versehene Brettseite mit einem zweiten Brett ohne Leim zusammengelegt und, nach Vorschrift der BASF, 5 1/2 Stunden gepreßt wurde. Zur Unterstützung des Härtevorganges erfolgte die Lagerung der Bretter für die Dauer eines Tages im Klimaraum bei Normalklima.

Der Ermittlung des spezifischen Preßdruckes lagen bei Khaya folgende Abmessungen der Bretter zugrunde:

Länge		Breite		Fläche
37,5 cm	x	24,3 cm	=	911,25 cm ²
44,6 cm	x	24,5 cm	=	1092,70 cm ²
44,6 cm	x	12,2 cm	=	544,12 cm ²
47,0 cm	x	12,0 cm	=	564,00 cm ²
37,3 cm	x	24,0 cm	=	895,20 cm ²
35,9 cm	x	12,0 cm	=	430,80 cm ²
37,3 cm	x	12,0 cm	=	447,60 cm ²
35,9 cm	x	12,0 cm	=	430,80 cm ²
35,9 cm	x	12,0 cm	=	430,80 cm ²
46,0 cm	x	12,0 cm	=	552,00 cm ²
46,0 cm	x	24,9 cm	=	1145,40 cm ²
Preßfläche =				<u>7444,67 cm²</u> =====

Mit einer Kolbenfläche von 1260 cm² und einem Kolbendruck von 6 N/mm² der Presse wurde ein spezifischer Druck von

$$p = 6 \times 1260 / 7445 \approx 1 \text{ N/mm}^2$$

aufgebracht.

Bei dem weicheren Abachi war für eine Fläche von

7	x	12,5 cm	x	50,0 cm	=	4375 cm ²
1	x	11,0 cm	x	50,0 cm	=	550 cm ²
5	x	10,0 cm	x	50,0 cm	=	2500 cm ²
						<u>7425 cm²</u> =====

ein Kolbendruck von $2,4 \text{ N/mm}^2$ gewählt worden, so daß auf eine Kolbenfläche von 1260 cm^2 ein spezifischer Preßdruck von

$$p = 2,4 \times 1260 / 7425 \approx 0,40 \text{ N/mm}^2$$

einwirkte.

Aufgrund der errechneten Werte wurden eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt, die ergaben, daß durch Überwiegendes Auftreten von Holzbrüchen bei der Bindefestigkeitsprüfung die gewählten Preßbrücke für eine dauerhafte Fixierung der zu verbindenden Teile ausreichend sind.

Verleimung mit Kaurit:

Wie bereits erwähnt, sieht die BASF für die Anwendung des Kaurit-Leimes zwei Auftragsmöglichkeiten vor, nämlich das Vorstrich- und das Untermischverfahren. Hier kam, wegen der kurzen Topfzeit des Härters, das Vorstrichverfahren zur Anwendung. Verwendet wurde Kaurit 220 Pulver und BASF-Härter 34.

Die Härterlösung wurde mit 15 Gewichtsteilen (5 GT, Härter 30 und 85 GT Wasser) vorbereitet. Die Leimflotte bestand aus 2,5 GT Leim und 1 GT Wasser. Nach gutem Umrühren mußte die Lösung eine Stunde reifen. Die Verarbeitung erfolgte im Kaltverfahren. Die zu verleimenden Proben wurden, genau wie bei der Kautschuk-Verleimung, vorbereitet. Die Holzfeuchte der Bretter lag bei der Verleimung bei ca. 12 %. Vorangegangen war eine 20-tägige Lagerung im Klimaraum bei Normalklima. Das Vorstreichen geschah wie folgt: eine Seite eines Brettes wurde mit Härterlösung bestrichen, die andere mit der Leimflotte, benetzt wurden ca. 250 g/m^2 Leim. Vor dem Zusammenlegen der beiden Brettseiten mußte die mit Härter bestrichene Fläche wieder trocken sein. Bei einer Laborraumtemperatur von ca. 20°C und einem spezifischen Preßdruck von $0,40 \text{ N/mm}^2$ für Abachi und $1,0 \text{ N/mm}^2$ für Khaya wurden die Platten $1/2$ Stunden gepreßt. Nach eintägiger Abkühlung im Normalklimaraum konnten die Proben gemäß den der DIN-Norm entsprechenden Maßen geschnitten werden.

Probenform:

Aus den verleimten Probenplatten wurden nach 24-stündiger Lagerung im Klimaraum Probenstäbe nach DIN 53254 zur Bestimmung der Bindefestigkeit von Längsverleimungen im Zugversuch geschnitten.

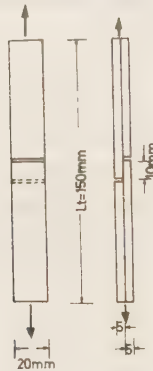


Bild 35: Probenform und Beanspruchung einer verleimten fehlerfreien Kleinprobe nach DIN 53254

In der Längsmittle der Stäbe erhielten die Proben auf jeder Seite jeweils einen Einschnitt. Dadurch ergab sich eine Prüf-fläche von 10 mm Länge x 20 mm Breite. Es wurde sorgfältig darauf geachtet, daß die Einschnitte genau bis zur Leimfuge reichten und nicht über diese hinausgingen.

Insgesamt wurden 840 Proben hergestellt. Diese 840 Proben setzten sich zusammen aus:

je	10 Proben	x	14	(verschiedene Lagerung nach Tabelle 2)
		x	3	Holzarten (Abachi, Khaya, Buche)
		x	2	Leimarten (Kauresin und Kaurit)
				= 840 Proben.

6.2. Klimatisierung der Proben

In dem unter 3.4. beschriebenen Heiß-Feucht-Wechselklima, welches in einem Köttermann-Schrank mit Werten von $20^{\circ}\text{C}/65\% \text{ rLF}$ und $40^{\circ}\text{C}/95\% \text{ rLF}$ erzeugt worden war, wurden die verleimten fehlerfreien Kleinproben der Gruppe 20 (Tabelle 2) 30 Tage lang klimatisiert. Dabei wurde eine Zyklusdauer von 24 Stunden festgelegt. Die dadurch entstehenden starken Klimagefälle von $20^{\circ}\text{C}/65\% \text{ rLF}$ auf $40^{\circ}\text{C}/95\% \text{ rLF}$ und umgekehrt, begünstigte den Niederschlag von Schweißwasser, wodurch die Proben härtesten Beanspruchungen ausgesetzt wurden. Beim Übergang von Klima 20/65 zu Klima 40/95 bildete sich Schweißwasser auf den Proben, das nach Temperatúrausgleich im Klima 40/95 wieder verdunstete. Beim Übergang von Klima 40/95 zu Klima 20/65 bildete sich erneut Schweißwasser, welches jedoch im Klima 20/65 nicht vollständig verdunstete.

Die vorgegebenen Werte für den Verlauf eines 24-Stunden-Zyklus im Heiß-Feucht-Wechselklima zeigt Bild 36.

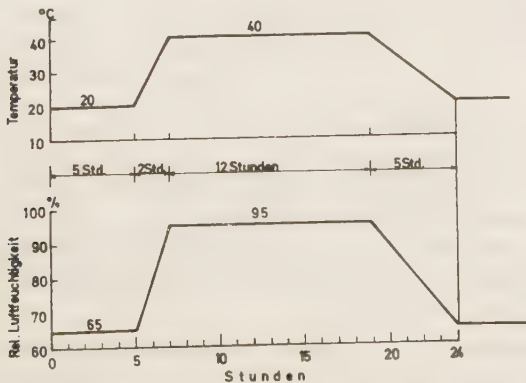


Bild 36: Verlauf des Wechselklimas im Köttermann-Klimaschrank während eines 24-Stunden-Zyklus

Während dieser wechselweisen Klimabeanspruchung verlief die Feuchtaufnahme der fehlerfreien Kleinproben aus Khaya und Abachi in dem Heiß-Feucht-Wechselklima nach den dargestellten Kurven in Bild 37, wobei die Meßwerte zu jeweils gleichem Zeitpunkt dem Bereich 40/95 entnommen wurden.

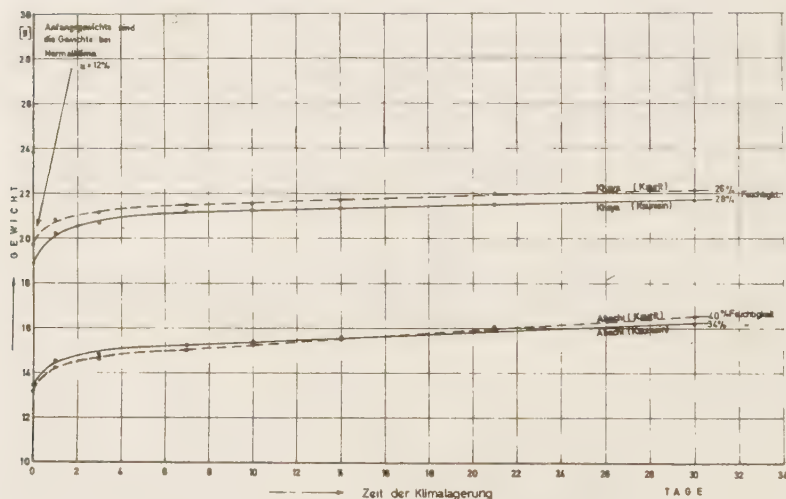


Bild 37: Konditionierung der verleimten fehlerfreien Kleinproben im Heiß-Feucht-Wechselklima

Parallel mit den verleimten Proben wurden verleimte Platten (Bezeichnung Nr. 140 in Tabelle 2) dem gleichen tropischen Wechselklima ausgesetzt.

Die Endfeuchtigkeiten dieser Unverleimten Platten lagen dabei im Mittel zwischen 28 % und 30 %, wobei bei der 18-tägigen Klimalagerung die Ausgleichsfeuchtigkeit noch nicht erreicht war.

Dieser Versuch sollte Aufschluß darüber geben, ob Hölzer

mit einem so hohen Prozentsatz an Feuchtigkeit verleimbar sind und ob die Haltbarkeit der Verleimung gewährleistet ist.

Die Kaltwasserlagerung erfolgte in einem großen Behälter, welcher mit Leitungswasser von ca. $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ gefüllt war. Die Heißwasserbehandlung und der Kochversuch wurden mit einem speziell dafür im Institut vorhandenen Kochbehälter vorgenommen, der mit einem Thermostat ausgerüstet ist, womit die gewünschte Temperatur genau eingestellt werden kann.

6.3. Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

Die Prüfung beruht auf der Bestimmung der Scherfestigkeit in der Leimfläche. Als Prüfmaschine wurde hier die Instron-Prüfmaschine verwendet, mit der in die Proben eine Zugkraft eingeleitet wurde. Wichtig war hier, daß die kleine, überlappt verleimte Probe so sorgfältig wie möglich in die Einspannbacken der Maschine eingelegt wurde, um damit jegliche Exzentrizität auszuschalten. Allerdings kommt bei diesen Versuchen, infolge der stets auftretenden Kraftumlenkung nie eine reine Scherbeanspruchung zustande, die Leimfläche wird vielmehr zusätzlich durch eine senkrecht zu den Probenflächen gerichtete Querkzugspannung belastet.

Die Proben wurden in die Maschine so eingespannt, daß die Enden der Proben auf ca. 50 mm Länge von den Einspannbacken erfaßt wurden. Die Bewegung des Querhauptes bei der Instron wurde für alle 840 Proben auf eine Belastungsgeschwindigkeit von 0,1 cm/min. eingestellt. Der Schreiber der Prüfmaschine zeichnete den Verlauf des Kraftanstieges bis zur Bruchlast auf.

6.4. Versuchsergebnisse

Die Verleimbarkeit der beiden Holzarten und ihre Fähigkeit, Belastungen sowohl unter normalen als auch unter extremen Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnissen zu überstehen,

bildeten den Kern der Untersuchung. Hierbei ist es das Bestreben, eine möglichst gute Bindefestigkeit der Leimfläche zu erreichen, welche nicht unter der reinen Holzfestigkeit liegt.

Der prozentuale Holzbruchanteil der verleimten fehlerfreien Kleinproben, in Verbindung mit ihrer durch Versuche bestimmten Scherfestigkeit nach der entsprechenden Konditionierung, wurde als Grundlage für die Beurteilung der Verleimbarkeit verwendet. Eine Anzahl von Forschern, darunter auch BERGIN (1953), EIKNER (1942) und OLSON (1955) glaubten, daß der Holzbruchanteil allein nicht ausreichend genug zur Beurteilung der Verleimbarkeit sei; weitere Kriterien zur Beurteilung der Bindefestigkeit, insbesondere von industriell gefertigten Verbindungen, wurden jedoch nicht angegeben. KITAZAWA (1946) verwendete einen Scherfaktor f_s als Maßstab für die Beurteilung der Verleimbarkeit:

$$f_s = \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

τ_1 = mittlere Scherfestigkeit nach den Vorschriften
des U.S.Dept. of Agriculture Technical Bulletin Nr.479

τ_2 = mittlere Scherfestigkeit der geprüften Proben

ρ_1 = mittlere Rohdichte der Proben mit der Scherfestigkeit τ_1

ρ_2 = mittlere Rohdichte der geprüften Proben mit der Scherfestigkeit τ_2 .

DIETZ, GRINSHOLDER und REISSNER (1946) stellten fest, daß die Rohdichte und die Feuchtigkeitsbewegung in tangentialer Richtung ein Maß für die Verleimbarkeit sei. CHUGG und JAMES (1965) verglichen die mittlere Bindefestigkeit und die mittlere Holzfestigkeit und stellten eine Beziehung zwischen ihrer Differenz und der Differenz zwischen der doppelten Standardabweichung 2_s her.

An Hand der hier gewählten Kriterien für die Beurteilung der Verleimbarkeit wurden Grenzzlinien durch eine Reihe von Vorversuchen festgelegt (Bild 38), wobei eine Bindefestigkeit $\geq 7,0$ N/mm² und ein Holzbruchanteil ≥ 70 % als sehr gut angesehen werden.

Tabelle 12 erläutert ausführlich die Beurteilung der Verleimbarkeit an Hand der festgelegten Grenzwerte.

Tabelle 12: Beurteilung der Verleimbarkeit von Holz an Hand von verleimten fehlerfreien Kleinproben

Kurzbezeichnung	Bindefestigkeit τ_B (N/mm ²)	Holzbruchanteil H_B (%)	Bewertung
7/70	$\tau_B \geq 7$	$H_B \geq 70$	sehr gut
6/60	$6 \leq \tau_B < 7$	$60 \leq H_B < 70$	gut
5/50	$5 \leq \tau_B < 6$	$50 \leq H_B < 60$	ausreichend
4/40 - 0/0	$\tau_B < 5$	$H_B < 50$	schlecht

Die gesamten Ergebnisse der Bindefestigkeitsprüfung der verleimten fehlerfreien Kleinproben sind in Tabelle 13 zusammengestellt, ein Balkendiagramm der Bindefestigkeiten zeigt Bild 38.

Tabelle 13: Ergebnisse der Bindefestigkeitsprüfung der verleimten fehlerfreien Kleinproben

T_B = Bindefestigkeit von verleimten fehlerfreien Kleinproben

s = Standardabweichung

Vz = Variationskoeffizient

n = Anzahl der untersuchten Proben

H_B = Prozentualer Holzbruchanteil

Holzart	Behandlungsart nach Tab. 2	A B A C H I						K H A Y A						B U C H E																	
		KAUR23IN			KAURIT			KAUR23IN			KAURIT			KAUR23IN			KAURIT														
		T _B N/mm ²	s N/mm ²	Vz %	T _B N/mm ²	s N/mm ²	Vz %	T _B N/mm ²	s N/mm ²	Vz %	T _B N/mm ²	s N/mm ²	Vz %	T _B N/mm ²	s N/mm ²	Vz %	T _B N/mm ²	s N/mm ²	Vz %												
10		6,40	1,36	21,19	10	84	5,69	1,21	21,61	10	80	11,28	2,15	19,06	10	60	9,72	1,857	19,11	10	84	13,93	1,655	11,73	10	100	11,07	3,646	32,92	10	101
20		4,92	0,80	16,24	10	57	4,96	0,75	15,23	10	73	7,04	1,13	16,05	10	76	6,62	1,033	15,61	10	18	8,08	2,106	24,44	10	70	5,71	1,685	25,49	10	75
30		5,16	0,77	13,73	10	60	5,66	1,03	22,42	10	90	8,75	2,07	23,65	9	77	9,23	0,808	9,62	10	38	9,49	2,968	21,28	10	92	8,16	2,931	35,91	8	62
40		4,79	0,53	19,36	10	46	5,38	1,32	24,60	10	60	8,65	1,33	13,30	8	27	7,04	1,265	17,92	10	56	6,19	1,454	23,49	10	52	4,85	1,908	32,77	7	57
50		4,69	1,09	23,16	10	62	6,31	1,60	26,65	10	71	8,51	1,43	17,76	10	72	8,80	1,144	13,91	10	55	10,21	2,197	18,46	10	84	6,15	1,727	19,08	9	98
60		5,73	1,38	16,87	10	25	4,44	0,38	8,65	10	72	8,31	0,70	12,98	10	59	6,36	1,779	27,99	10	79	6,80	1,296	21,48	9	84	6,15	1,422	23,12	10	51
70		5,74	1,07	18,37	10	47	5,75	0,99	17,34	10	83	8,92	1,12	16,81	10	64	8,57	0,996	11,63	10	61	10,32	2,159	20,70	10	92	8,81	1,972	22,39	9	80
80		5,64	0,67	15,45	10	40	4,49	0,58	12,95	10	74	8,42	0,78	9,25	9	76	4,51	1,164	25,81	9	11	7,93	1,253	15,02	10	86	Probe entleimt vor Belastung				
90		5,66	1,11	19,59	10	43	5,73	0,77	13,40	10	86	8,02	0,697	8,69	10	90	6,52	2,107	32,34	9	12	7,47	1,512	20,23	10	90	4,67	1,954	12,68	6	10
100		5,59	0,58	10,31	10	23					62	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			5,47	1,109	20,27	9	58	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			5,47	1,109	20,27	9	58	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			
110		4,97	0,88	19,04	10	68					58	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			8,50	1,210	14,24	10	58	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			4,91	1,192	24,27	10	50	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			
120		4,95	0,43	8,74	10	20					75	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			9,05	2,054	22,70	10	85	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			4,92	1,795	36,45	10	15	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			
130		5,72	0,43	8,62	10	65					75	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			9,05	2,054	22,70	10	85	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			4,92	1,795	36,45	10	15	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			
140		2,07	0,70	33,93	10	30					10	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			4,92	1,795	36,45	10	15	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			4,92	1,795	36,45	10	15	Alle 10 Proben entleimt vor der Belastung			

Bei $n_k \leq 20\%$ Werte nicht wertvoll

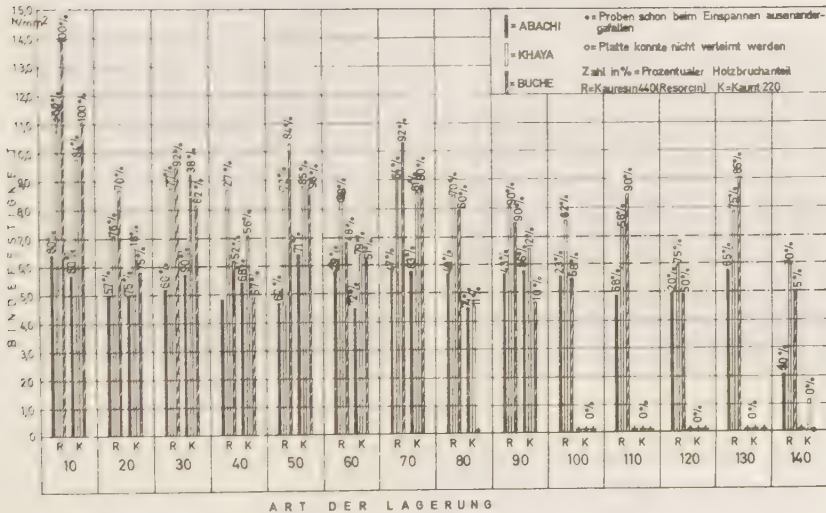
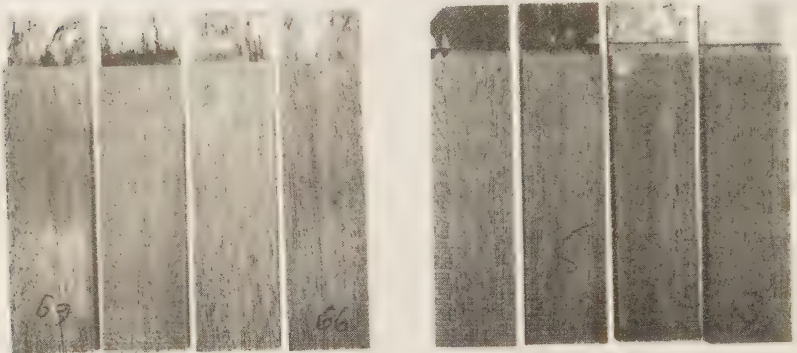


Bild 38: Darstellung der Ergebnisse der Bindefestigkeitsprüfung von verleimten fehlerfreien Kleinproben
 (---) = Grenzlinien für die Bewertung der Verleimbarkeit
 (Art der Lagerung oder Behandlungsart vgl. Tab.2)

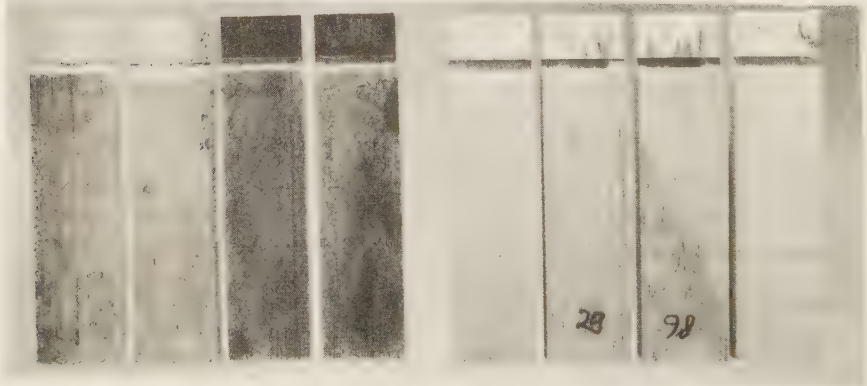
In den nachfolgenden Bildern 39a bis 39c sind einige bei der Bindefestigkeitsprüfung aufgetretenen Bruchflächen dargestellt.

Weiter zeigt Bild 40 die Abhängigkeit der Bindefestigkeit der Leimverbindung von der Holzfeuchtigkeit von Abachi und Khaya bei Kauresin- bzw. Kauritverleimung.

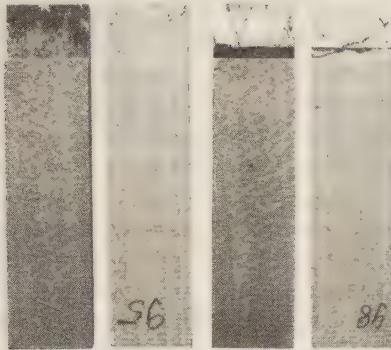
Bild 39: Holzbruch- bzw. Leimbruchanteil der verleimten fehlerfreien Kleinproben



- a) Khaya: links - überwiegend Holzbruch bei Kauresin- und Kaurit-Leim
 rechts - überwiegend Leimbruch:
 Kauresin-Leim (schwarze Fläche)
 Kaurit-Leim (weiße Fläche)



- b) Abachi: links - überwiegend Leimbruch bei Kaurit-Leim (helle Fläche),
 bei Kauresin-Leim (dunkle Fläche)
 rechts - überwiegend Holzbruch



- c) Buche: die beiden linken Proben zeigen überwiegend Leimbruch
die beiden rechten Proben zeigen überwiegend Holzbruch

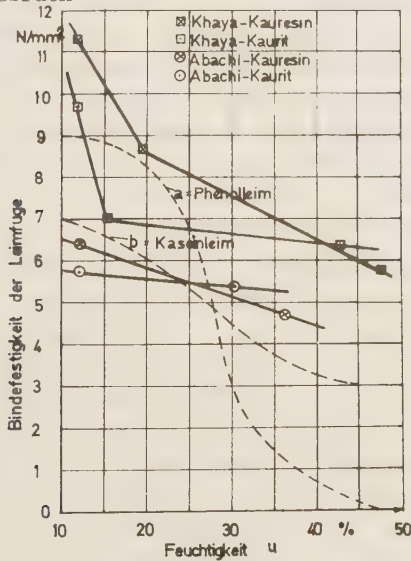


Bild 40: Abhängigkeit der Bindefestigkeit der Leimverbindung von der Holzfeuchtigkeit von Abachi und Khaya bei Kauresin- bzw. Kauritverleimung
----- Vergleichswerte für Nadelholz nach DUTKO (1969)

6.5. Diskussion der Versuchsergebnisse

An Hand der Beurteilungskriterien der überlappt verleimten fehlerfreien Kleinproben (vgl. Tabelle 12 u. Bild 38) kann festgestellt werden, daß eine Verleimung beider Holzarten mit Kauresin- bzw. Kauritleim unter normalen Bedingungen, d.h. bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit, hinsichtlich der Bindefestigkeiten gute Ergebnisse liefert. Bei den Wasserbehandlungen ist allgemein festzustellen, daß, ausgehend vom Normalklimazustand (Behandlungsart 10), die Festigkeitswerte ab 1 Tag Wasserlagerung (Behandlungsart 40 und 60), über Heißwasser (Behandlungsart 80), Kochbehandlung (Behandlungsart 100 und 120), zur schärfsten Beanspruchung (Behandlungsart 140), fallende Tendenz zeigen. Dies ist besonders deutlich bei den Kaurit-Verleimungen zu beobachten (Bild 41). Ausnahmen bilden jedoch die Behandlungsarten 60 bis 80 bei den mit Kauresin verleimten Proben (Bild 42). Gestrichelt gezeichnet sind in den Bildern 41 und 42 auch die entsprechenden Holzbruchanteile in %, welche ebenfalls mit zunehmender Schärfe der Behandlung abfallende Tendenz zeigen. Schon bei Behandlungsart 100, bei Buche sogar ab Behandlungsart 80, fielen die Festigkeiten bei mit Kaurit verleimten Proben bis null. Bei Kauresin-Verleimung blieb auch im extremsten Behandlungsfall 140 eine Restfestigkeit erhalten, eine Eigenschaft, welche für den Einsatz dieses Leimes im extremen Heiß-Feucht-Klima spricht.

In den Bildern 41 und 42 sind auch die Werte des Behandlungsfalles 20 (Heiß-Feucht-Wechselklima) sowie die Scherfestigkeit (τ_s) der Hölzer selbst aus den Kreuzscherversuchen strichpunktiert eingezeichnet. Man ersieht daraus, daß bei beiden Leimen die τ_s - und τ_{B10} -Werte (τ_{B10} =Bindefestigkeit bei der Behandlungsart 10) von Khaya ziemlich nahe beieinanderliegen, ein durchaus akzeptables Ergebnis für die Verleimung unter Normalbedingungen. Die Geraden der Behandlungsart 20 liegen bei Khaya für beide Leime zwar niedriger als τ_s , zeigen jedoch ausreichende Festigkeit für die Verleimung bei diesem Klima (vgl. Tabelle 12 und Bild 38).

Die τ_s - und τ_{B20} -Werte bei Abachi liegen dicht beieinander und zeigen damit, daß die Bindefestigkeit, die hier erzielt worden ist, genau der Holzfestigkeit entspricht, womit das eigentliche Ziel der Verleimung erfüllt ist. Ausweislich der Beurteilungsskala nach Tabelle 12 und auch nach Bild 38 lag jedoch Abachi bei ausreichend bis schlecht. Aufgrund der großen Wasseraufnahmefähigkeit von Abachi mußte die Leimfläche unter der Befeuchtung gelitten haben. Damit wird eine Verleimung von Abachi unter extremen Klimabedingungen in Frage gestellt. Unerlässlich wäre aber auf jeden Fall, falls eine solche zur Anwendung kommt, eine entsprechende Imprägnierung sowie weitere definitive Schutzmaßnahmen, um das verhältnismäßig weiche Abachi-Holz zusätzlich noch vor Insekten- und Pilzbefall zu schützen.

Im Bild 43 und 44 sind die Bindefestigkeiten τ_B aufgetragen, die sich entsprechend den Behandlungsarten der Bilder 41 und 42, jedoch jetzt nach einer jeweils 7-tägigen Lagerung im Normalklima (Behandlungsarten 30, 50, 70, 90, 110, 130) ergaben. Dabei ist auffallend, daß die Proben nach dieser zusätzlichen Normalklimabehandlung, die nach jeder der Behandlungsarten 20, 40, 60, 80, 100 und 120 stattfand, eine Steigerung der Bindefestigkeit zeigen.

Diese Tatsache zeichnet sich am deutlichsten bei den mit Kaurit verleimten Proben ab, wobei ab Behandlungsart 100 dann keine Festigkeiten mehr zustande kamen.

Die Proben mit überwiegenden Leimbrüchen (vgl. Bild 39 bis 39c) waren zum großen Teil diejenigen, die eine der schwersten Behandlungsarten, z.B. Heißwasser- oder Kochbehandlung erfahren haben. Dies war wiederum meistens bei den Kaurit-Verleimungen der Fall. PLATH (1951) erwähnt jedoch, daß bei Harnstoffharzen (z.B. Kaurit), tropen- und kochfeste Verleimungen durch Zusätze von Melaminharz erreicht werden können.

Bei Kauresin-Verleimungen (Bild 44) war die Erscheinung des alternierenden Kurvenverlaufes ebenfalls zu beobachten, jedoch nicht ganz so ausgeprägt wie bei Kaurit-Verleimungen (vgl. Bild 43) vor allem bei Abachi und Khaya in den Bereichen der Heißwasser-Behandlung ab Behandlungsart 80. Die Leim-Holzbindung mußte in diesem Bereich dem Wechsel von Naß- bzw. Trockenbehandlung standhalten, wobei zwar ein Festigkeitsabfall, nicht aber die sonst bei Khaya und Abachi festgestellte Festigkeitsschwankung auftrat. Dies spricht für die Zuverlässigkeit dieses Leimes in den heiß-feuchten Ländern. Damit kann erwartet werden, daß eine Verleimung von Khaya-Holz mit Kauresinleim sich auch in extrem heiß-feuchten Klimaten wie Ghana bewähren wird.

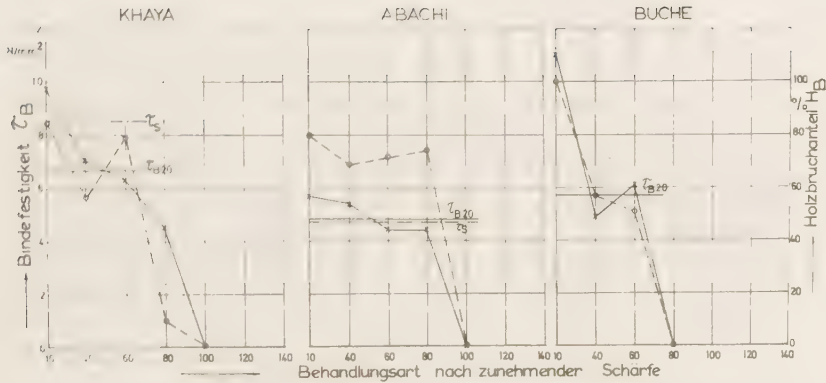


Bild 41: Bindefestigkeit τ_B (—) und Holzbruchanteil H_B (----) von kauritverleimten Khaya-, Abachi- und Buchenproben in Abhängigkeit von der Schärfe der Behandlung nach Tab.2, ohne die dazwischenliegenden anschließenden Normalklimalagerungen bei 30, 50, 70, 90, 110, 130.
(τ_S = Mittelwert der Festigkeit v. Fund und $\parallel$ belasteten Kreuzscherproben;

τ_{B20} = Bindefestigkeit der in Heiß-Feucht-Wechselklima gelagerten Proben, Behandlungsart 20).

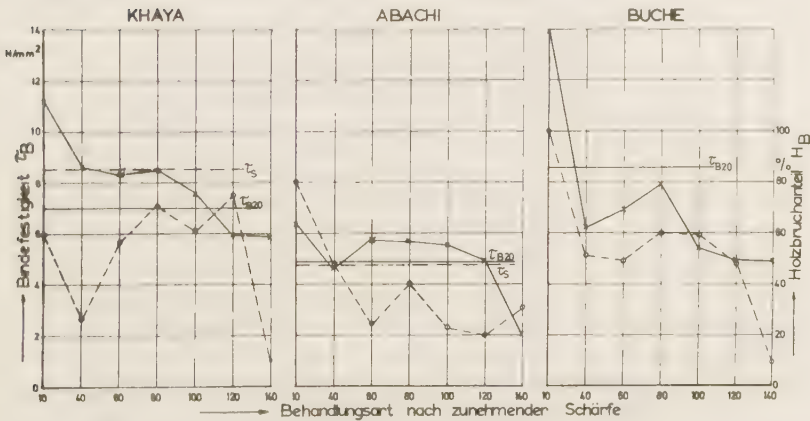


Bild 42: Bindefestigkeit τ_B (—) und Holzbruchanteil H_B (----) von kauresinverleimten Khaya-, Abachi und Buchenproben in Abhängigkeit von der Schärfe der Behandlung nach Tab.2 ohne die Behandlungsarten 30, 50, 70, 90, 110, 130.
(τ_S = Mittelwert der Festigkeit von $\perp$ - und $\parallel$ belasteten Kreuzscherproben;
(τ_{B20} = Bindefestigkeit der in Heiß-Feucht-Wechselklima gelagerten Proben, Behandlungsart 20).

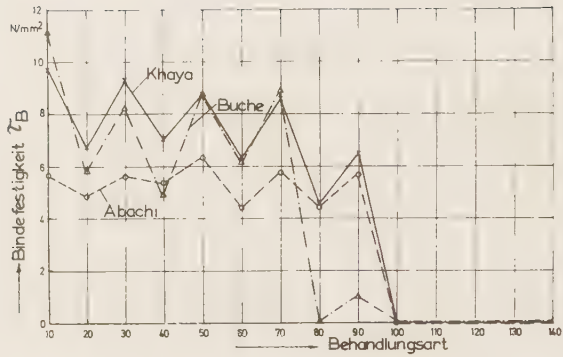


Bild 43: Bindefestigkeiten τ_B von kauritverleimten Khaya-, Abachi- und Buchenproben nach einer 24-stündigen Lagerung im Normalklima in Abhängigkeit von der Schärfe der Behandlung nach Tabelle 2

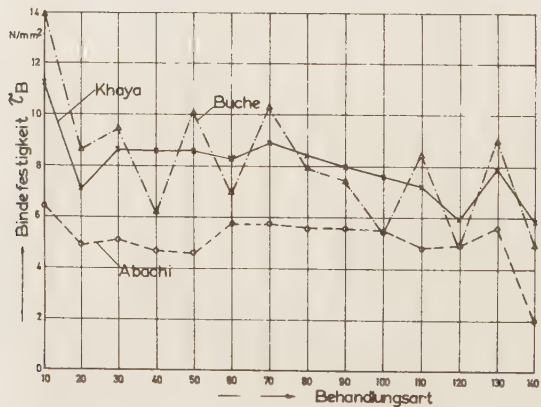


Bild 44: Bindefestigkeiten τ_B von kauresinverleimten Khaya-, Abachi- und Buchenproben nach einer 24-stündigen Lagerung im Normalklima in Abhängigkeit von der Schärfe der Behandlung nach Tabelle 2

7. Prüfung von verleimten Brettschichtträgern

7.1. Herstellung der Träger

Zur Untersuchung des Biegeverhaltens von Brettschichtträgern aus den hier untersuchten Holzarten wurden aus Abachi, Khaya und Buche insgesamt 48 Modellbalken hergestellt. Zur Herstellung eines Balkens wurden 8 Lamellen von je 15 mm Dicke und 6 cm Breite verwendet. Daraus ergab sich bei einer Länge von 2,10 m die Abmessung eines Trägers zu 6 cm x 12 cm x 210 cm. Bei einer Länge von 2,10 m konnte auf eine Keilzinkung der einzelnen Bretter, wie dies bei Brettschichtträgern üblich ist, verzichtet werden.

Bei den 48 Versuchsbalken erfolgte je zur Hälfte eine Kaurensin- bzw. Kaurit-Verleimung. Da die Herstellung der Brettschichtträger besondere Fachkenntnis erfordert und nur Spezialfirmen mit Genehmigung damit beauftragt werden, wurde im Institut ebenfalls mit großer Sorgfalt bei der Herstellung der für die Arbeit benötigten Proben vorgegangen.

Die einzelnen Arbeitsgänge wurden in folgenden Stufen durchgeführt:

- a) Auswahl des Materials
- b) Vorbereitung des Materials
- c) Leimen und Pressen
- d) technische Kontrolle

Zu a) Auswahl des Materials:

Um Holz effektiver und mit optimaler Wirtschaftlichkeit verwenden zu können, werden in Europa Nadelhölzer, die zur Herstellung von geleimten Konstruktionen bestimmt sind, hinsichtlich ihrer Fehler genau sortiert. Diese Maßnahme ist von äußerster Wichtigkeit. Sie verhindert die Verwendung zweitklassigen Materials und gewährleistet die Haltbarkeit der Leimträger. Das Forest Products Research Bulletin No.53 (CURRY, 1970) aus Princeton Risborough weist z.B. Sortierungsvorschriften aus und schreibt für Schichtholzbalken drei Güteklassen vor. Berücksichtigt werden insbesondere Faserverlauf und Ästigkeit.

Ebenso wird in DIN 1052 bzw. DIN 4074 zwischen drei Güteklassen unterschieden.

Anders ist die Situation bei Laubhölzern. SCHULZ (1976) erwähnt, daß die Verwendung von Laubhölzern im Holzleimbau bisher eingeengt ist, da es in den meisten Ländern, besonders in den tropischen, keine oder nur ungenaue Vorschriften über ihre Sortierung gibt.

Das für die vorliegende Arbeit zur Verfügung stehende Material war fast fehlerfrei, wofür Hölzer aus den Tropen hinreichend bekannt sind. Hinsichtlich der Auswahl der Lamellen bestanden deshalb keine Schwierigkeiten. Lediglich bei Khaya mußte die vorhandene Drehwüchsigkeit des Holzes in Kauf genommen werden. Die Lamellen entstammten den gleichen Stämmen, aus denen die fehlerfreien Kleinproben entnommen worden sind.

Zu b) Vorbereitung des Materials:

Zu beachten war hier

- die Vorbereitung der Lamellenoberfläche
- die Holzfeuchtigkeit der zu verleimenden Lamellen,
- die Dicke der Lamellen,
- die Anordnung der Lamellen.

Erfahrungsgemäß lassen sich durch maschinelles Hobeln hergestellte Oberflächen am besten verleimen. Um einer evtl. Verschmutzung der Oberflächen vorzubeugen, sollte die Verleimung sofort erfolgen, da selbst die geringste Staubschicht sich negativ auf den Abbindevorgang des Leimes auswirken würde.

Ebenfalls eine wichtige Rolle spielt die Prüfung des Feuchtigkeitsgehaltes der einzelnen Lamellen vor der Verleimung. Nicht gut getrocknete Lamellen führen häufig zu Fehlverleimungen.

DUTKO (1969) schlägt einen maximalen Holzfeuchtigkeitsgehalt von 12 % bis 15 % vor. Aus Bild 40 war zu ersehen, wie sich die Bindefestigkeit der Leimfuge mit zunehmender Holzfeuchtigkeit verminderte.

Auch in den Holzhausrichtlinien (ergänzende Bestimmung zu DIN 1052) wird die Holzfeuchtigkeit auf den Bereich $9\% \leq u \leq 15\%$ eingeschränkt. Außerdem müssen Lamellen, die zu einem Balken verleimt werden sollen, einen einheitlichen Feuchtigkeitsgehalt besitzen. Feuchtigkeitsunterschiede zwischen Lamellen dürfen nicht mehr als 5% betragen (DUTKO, 1960). Lamellen mit größeren Feuchtigkeitsunterschieden sind für eine Verleimung ungeeignet, da dieser Umstand eine ungleichmäßige Trocknung zur Folge hätte, die zu Eigenspannungen führt, was letztlich sogar vor Belastung der Balken ein Versagen derselben herbeiführen kann. Aus den angeführten Gründen wurden daher die Lamellenrohlinge nach dem Schneiden so lange im Normalklima gelagert, bis ein Feuchtigkeitsgehalt von 12% bis 14% erreicht war. Zur Vermeidung der Neuaufnahme von Feuchtigkeit wurden die Rohlinge anschließend sofort gehobelt und verleimt.

Nach DIN 1052 ist die Lamellendicke im allgemeinen auf 3 cm beschränkt, in Ausnahmefällen darf sie höchstens 4 cm betragen, z.B. bei geraden Trägern (MÖHLER, 1976). Bei der Anordnung der Brettlamellen unterscheidet man zwischen der versetzten und der unversetzten Anordnung (vgl. Bild 45).

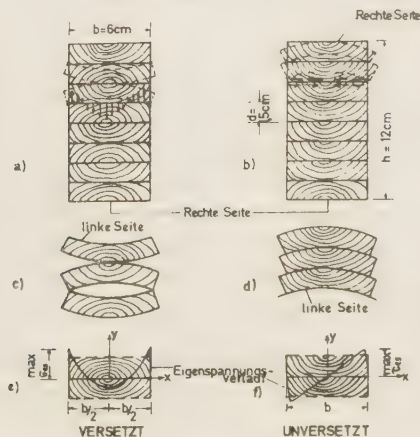


Bild 45: Anordnung der Brettlamellen mit qualitativem Verlauf der Eigenspannung in der Leimfuge

Trotz bestehender Nachteile hinsichtlich eventuell auftretender Eigenspannungen in der Leimfuge, die durch Quellen gegenseitig versetzter Lamellen hervorgerufen werden kann, wird Anordnung a) häufig von Zimmerleuten bevorzugt. Versuche nach EGNER (1959) zeigen deutlich, daß bei dieser Anordnung die Lamellen während der nachfolgenden Trockenlagerung in der Leimfuge auseinanderreißen. Außerdem wird bei DUTKO (1969) gezeigt, wie gefährlich die Eigenspannungen sind, die durch Quellen der versetzten Lamellen entstehen können.

Bei der unversetzten Anordnung b) müssen stets "rechte" und "linke" Brettseiten aufeinandergeleimt werden. An den Außenseiten sollten jedoch nur "rechte" Brettseiten liegen (EGNER, 1959 u. MÖHLER, 1970). Der Vorteil dieser Anordnung besteht darin, daß die Verbindung beim Schwinden bzw. Quellen der Lamellen nur durch Schub in Richtung der Leimfläche quer zur Faserrichtung des Holzes beansprucht wird. Es entsteht dabei in der Leimfuge keine Normalspannung.

Weiter erwähnt EGNER (1959), daß in einer Atmosphäre mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 90 % - dies wäre in West-Afrika der Fall - überhaupt viel seltener Schäden an geleimten Bauteilen auftreten. Werden dagegen die Lamellen bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 % und einer Temperatur von 25°C bis 30°C, wie dies z.B. in Ghana häufig der Fall ist, verleimt, so würde sich eine Holzfeuchtigkeit von ca. 26 % einstellen (vgl. Diagramm in Bild 9 bei DUTKO, 1969). Bei einer so hohen Feuchtigkeit der Hölzer vor der Verleimung ist dagegen keine zuverlässige Leimverbindung herzustellen, wie Tabelle 12 und Bild 38 z.B. bei Behandlungsart Nr. 140 zeigt. Inwieweit nun tropische Hölzer und Konstruktionen in den Tropen durch eine so hohe, ständig wirkende Holzfeuchtigkeit beeinflusst werden, läßt sich nur anhand von Dauerversuchen und langen Beobachtungen in den Tropen selbst feststellen.

Bei Brettschichtkonstruktionen erfolgt die Verteilung der Lamellen je nach Qualität, d.h., die besseren an die Randzonen,

die schlechteren in die Kernzone. Infolge der gleichmäßig guten Beschaffenheit der vorhandenen afrikanischen Hölzer konnte auf diese Verteilung verzichtet werden.

Um ungleichmäßiges Quellen der Lamellen zu vermeiden, sollten Seitenbretter und Riftbretter nicht für ein und dasselbe Bauteil verwendet werden, sondern sollten getrennt verarbeitet werden (EGNER, 1959).

zu c) Leimen und Pressen:

Das Vorbereiten der Leime erfolgte genauso, wie unter 6.1. (Verleimung mit Kauresin bzw. Verleimung mit Kaurit) beschrieben wurde. Auch ähnliche Leimmengen je zu verleimende Flächeneinheit wie in 6.1. angeführt, wurden hier mit Hilfe einer Handwalze aufgetragen.

Während der Verleimung herrschte in der Werkstatt normale Zimmertemperatur. Um eine erfolgreiche Verleimung zu garantieren, müssen die Lamellen mit einem entsprechenden Druck gepreßt werden. Dazu wurde die im Institut vorhandene Schlauchpresse (Bild 46) verwendet, die den für eine Laubholzverleimung erforderlichen Preßdruck von ca. 5 bis 10 bar gewährleistete. In der Praxis finden jedoch auch andere Preßvorrichtungen Verwendung, wie z.B. mechanische, elektrische, hydraulische oder solche mittels Preßluft oder Federdruck.

zu d) Technische Kontrolle:

Diese erfolgte, wie unter 7.2. angegeben, durch regelmäßiges Wiegen und Überwachen der Balken sowie durch ständiges Kontrollieren der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit der Klimaräume.

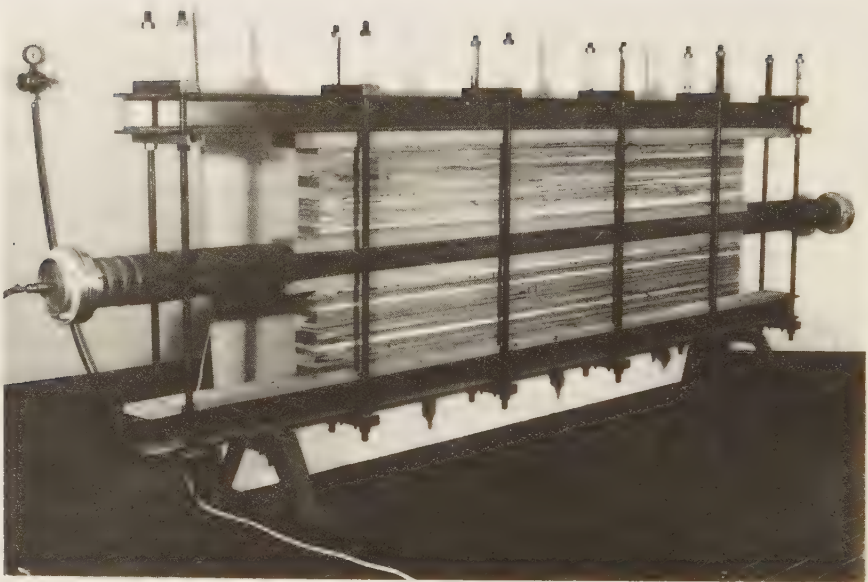


Bild 46: Schlauchpresse mit zwei Brettschichtbalken

7.2. Klimatisierung der Träger

Aus den nach 7.1. angefertigten 48 Balken wurden 12 Träger, d.h. 4 Balken aus Abachi, 4 aus Khaya und 4 aus Buche mit Kauresinverleimung und 12 entsprechende Träger mit Kauritverleimung im Normalklima klimatisiert. Die gleiche Anzahl Träger wurde in einem Heiß-Feucht-Konstantklima (vgl. 3.3.) gelagert, bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz (Dauer etwa 150 Tage).

Die Balken wurden nach der Entnahme aus dem Klimaraum sofort der Biegeprüfung unterzogen. Danach wurden den Balken Proben aus der näheren Bruchstelle zur Bestimmung der Rohdichte und der Holzfeuchtigkeit entnommen. Für das gesamte Versuchsmaterial ergaben sich dabei die in Tabelle 14 aufgeführten mittleren Holzfeuchtigkeits- und Rohdichtewerte.

Tabelle 14: Mittlere Holzfeuchtigkeit und die dazugehörige Rohdichte der Brettschichtträger bei der Biegeprüfung

Holzart	Leimart	Klima	Holzfeuchtigkeit (u %)	ρ_u (g/cm ³)
Abachi	Kauresin	Normal	15	0,44
Khaya	Kauresin	Normal	13	0,64
Buche	Kauresin	Normal	13	0,67
Abachi	Kaurit	Normal	17	0,44
Khaya	Kaurit	Normal	16	0,63
Buche	Kaurit	Normal	16	0,68
Abachi	Kauresin	Heiß- Feucht- Konstant- klima	22	0,48
Khaya	sowie		21	0,73
Buche	Kaurit		22	0,77

Während die mit Kauresin und Kaurit verleimten Proben nach der Klimatisierung im Normalklima unterschiedliche Feuchtigkeitsbeträge aufwiesen, waren diese nach der Lagerung im heiß-feuchten Klima für die Proben beider Leimarten gleich. Die Rohdichtewerte wiesen nach der Lagerung im heiß-feuchten Klima um etwa 8-12% höhere Werte auf, als nach der Lagerung im Normalklima.

Um einem evtl. Pilzbefall vorzubeugen, wurden die Balken, die dem Heiß-Feucht-Klima ausgesetzt wurden, vorher mit Xylamon gestrichen.

7.3. Prüfverfahren und Versuchsdurchführung

Nach Klimatisierung der Träger im Normalklima bzw. in einem Heiß-Feucht-Klima wurden diese auf ihre Biegefestigkeit geprüft. Aufbau und Abmessungen der Träger sowie das Schema der Lastanordnung sind aus Bild 47 ersichtlich.

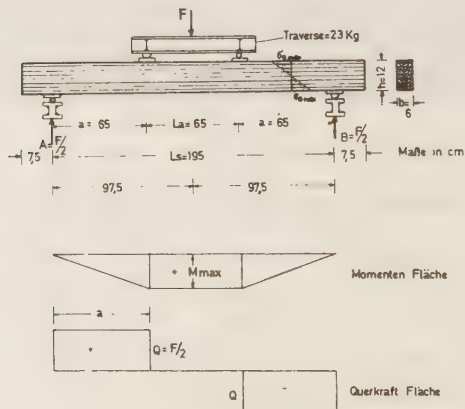


Bild 47: Schema der Lastanordnung sowie Aufbau und Abmessungen der Träger mit Darstellung der Momenten- und Querkraftflächen

Für die Prüfung der Probenbalken stand eine Prüfeinrichtung im Materialprüfungsamt der Technischen Universität München zur Verfügung. Zum Transport dorthin wurden die Balken in eine Plastikhülle verpackt und eingeschweißt, um eine Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes während des Transportes zu verhindern. Bild 48 zeigt die Prüfeinrichtung mit einem geprüften Balken. Die Meßuhr in der Feldmitte der Balkenunterseite wurde kurz vor dem Bruch entfernt.

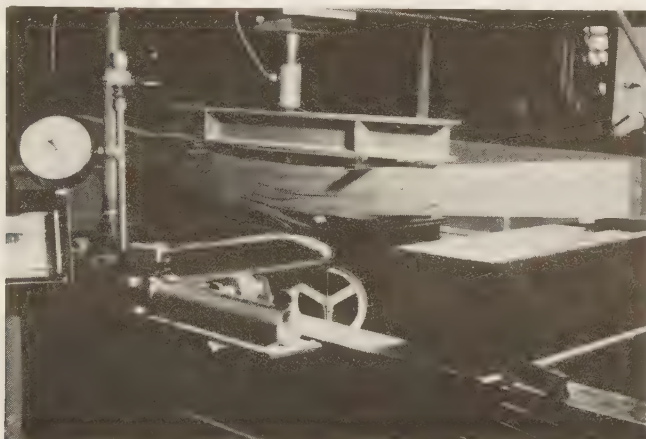


Bild 48: Prüfeinrichtung für die Biegefestigkeitsprüfung der Brettschichtträger

Es wurde, einschließlich des Traversengewichtes, von einer kleinen Vorlast von 1540 N ausgegangen. Die Belastung erfolgte in Stufen von 4000 N. Jeweils 2 min. nach Erreichen einer Laststufe wurde die Durchbiegung der Träger in Feldmitte gemessen. Nach der ersten Last von $F = 4000 \text{ N}$ wurden die Träger viermal völlig entlastet und wieder belastet, um den elastischen Anteil der Durchbiegung feststellen zu können. Anschließend erfolgte die stufenweise Belastung weiter bis zum Bruch.

Die Prüfkraft wurde durch einen Hydraulikzylinder erzeugt und unter Zwischenschaltung einer Kraftmeßdose auf die in Bild 47 und Bild 48 sichtbare 230 N schwere Traverse aufgebracht, die ihrerseits über lose Rollen die Balken belastete.

Die Kraftmeßdose war mit einem Meßverstärker verbunden, an dem die Prüfkraft in digitaler Form abgelesen werden konnte.

Durch die hier verwendete Zweipunktbelastung wird die Strecke zwischen den Laststellen mit einem konstanten Biegemoment beansprucht und somit schubspannungsfrei bleiben. Das maximale Biegemoment $\max M$ befindet sich in dem mittleren querkraftfreien Drittel des Balkens zwischen den zwei Einzellasten und nimmt linear bis zum Auflagerpunkt auf Null ab.

Aus der Festigkeitslehre errechnen sich nach Bild 47:

$$\begin{aligned} \text{Auflagerkräfte } A &= B = F/2 = \text{Querkraft } Q \\ \max M &= A \cdot a = F/2 \cdot \frac{L_s}{3} \end{aligned} \quad (11)$$

Hier ist $a = L_a = L_s/3$

Somit maximale Biegespannung in Feldmitte

$$\max \sigma_B = \frac{\max M}{W} = \frac{\max M}{b} \cdot \frac{6}{h^2} = \frac{F \cdot L_s}{b \cdot h^2} \quad (12)$$

Diese Spannung tritt in den Randfasern des Balkens auf.

(W = Widerstandsmoment des Rechteckquerschnitts)

Die $E_B \cdot I$ -fache größte Durchbiegung f in Trägermitte beträt

$$\begin{aligned} E_B \cdot I \cdot f &= \frac{F/2 \cdot a}{24} \cdot (3L_s^2 - 4a^2) \\ &= \frac{23 \cdot F \cdot L_s^3}{2 \cdot 648} \end{aligned} \quad (13)$$

An Hand dieser Gleichung wird der Biege-E-Modul E_B aus der gemessenen Durchbiegung f berechnet.

Die maximale Schubspannung errechnet sich zu

$$\max \tau = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot h \cdot b} = \tau_0 \quad (14)$$

und tritt in der neutralen Zone auf.

7.4. Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Biegeprüfung der Schichtholzträger sind in den Tabellen 15a bis 15d enthalten. Bei den zum Vergleich herangezogenen Schichtholzträgern aus Buche waren überwiegend Schubbrüche entlang der Leimfuge zustande gekommen. Abachi zeichnete sich, mit Ausnahme von wenigen Balken, überwiegend durch Biegezugbrüche aus, während Khaya teils Biege- teils Biegeschubbrüche zeigte. Bild 49 zeigt die aufgetretenen typischen Bruchformen.



Bild 49: Typische Bruchformen der geprüften Schichtholzträger
 A = Biegezugbruch bei Abachi
 B = Biegezugbruch bei Khaya
 C = Biegeschubbruch bei Buche

Als Maß für die Formänderung der Schichtholzträger unter der Belastung wurde die Durchbiegung der Trägerunterkante in Feldmitte aufgezeichnet. Zu diesem Zweck wurde eine Meßuhr mit 0,01 mm Einteilung verwendet.

Die bei den einzelnen Laststufen gemessenen Durchbiegungen sind an einem Beispiel in Bild 50 graphisch dargestellt.

Der Biege-E-Modul E_B wurde aus der Durchbiegung f bei einer Last (einschließlich Vorlast) von 4000 N berechnet.

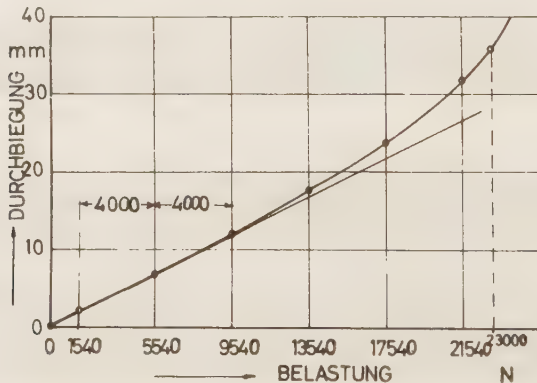


Bild 50: Beispiel eines Durchbiegungs-Diagrammes eines Balkens beim Biegeversuch:

Balken Nr. 25 - Khaya mit Kauresin-Verleimung
und klimatisiert im Heiß-Feucht-Klima

Tabelle 15: Ergebnisse der Biegeprüfungen der Brettschichtträger

a) KAURESIN-verleimt und konditioniert in Normalklima

Träger-Nr.	$\max F$ (N)	$\max \sigma_B$ (N/mm ²)	$\max \tau_o$ (N/mm ²)	r (cm)	E-Modul (N/mm ²) bei 4000 N		Bruchbeschreibung
KHAYA							
1	28010	63,3	2,92	0,500	12184		Biegezugbruch
2	31150	70,4	3,24	0,489	12438		Biegeschubbruch in 3., 4. u. 6. Leimfuge von unten
3	33610	76,0	3,50	0,467	13045		Biegeschubbruch in Leimfuge zw. 4. u. 5. Lamelle von oben
4	28430	64,3	2,96	0,463	13158		Biegeschubbruch in 2. Lamelle von unten u. etwas Biegebruch
Mittel	30300	68,5	3,16	0,480	12711	12700	
ABACHI							
5	22890	51,7	2,38	0,713	8544		Biegezugbruch
6	24290	54,9	2,53	0,766	7953		Biegezugbruch
7	24870	56,2	2,59	0,741	8222		Biegezugbruch
8	27210	61,5	2,83	0,712	8556		Biegezugbruch
Mittel	24820	56,1	2,59	0,733	8319	8300	
BUCHE							
9	36200	81,8	3,77	0,433	14070		Biegeschubbruch in 1. Lamelle von unten rechts bis zur Lamelle in Höhengmitte
10	37600	85,0	3,92	0,455	13389		Biegeschubbruch in Leimfuge zw. 3. u. 4. Lamelle von unten
11	35000	79,1	3,65	0,455	13381		Biegeschubbruch u. etwas Biegebruch
12	37360	84,4	3,89	0,468	13017		Biegeschubbruch in 3. Leimfuge v. unten
Mittel	36540	82,6	3,81	0,453	13464	13500	

b) KAURIT-verleimt und konditioniert in Normalklima

Träger-Nr.	$\max F$ (N)	$\max \sigma_B$ (N/mm ²)	$\max \tau_o$ (N/mm ²)	r (cm)	E-Modul (N/mm ²) bei 4000 N		Bruchbeschreibung
KHAYA							
13	31420	71,0	3,27	0,443	13752		Biegeschubbruch
14	31670	71,6	3,30	0,459	13273		Biegezugbruch
15	30450	68,8	3,17	0,490	12433		Biegezugbruch mit etwas Biegeschubbruch in d. 3. Lamelle v. oben
16	30220	68,3	3,15	0,474	12853		Biegezugbruch
Mittel	30940	69,9	3,22	0,467	13078	13100	
ABACHI							
17	25310	57,2	2,64	0,710	8581		Biegeschubbruch in der 2. Leimfuge von unten
18	20320	45,9	2,12	0,735	8289		Biegeschubbruch in 3. u. 4. Leimfuge von oben
19	27490	62,1	2,86	0,747	8156		Biegezugbruch
20	22900	51,8	2,39	0,774	7871		Biegezugbruch
Mittel	24010	54,3	2,50	0,741	8224	8200	
BUCHE							
21	36750	83,1	3,83	0,459	13271		Biegezugbruch u. etwas Biegeschubbruch in 3. Lamelle von oben
22	34320	77,6	3,58	0,436	13973		Biegeschubbruch in 2. Leimfuge u. 2. Leimfuge von oben u. etwas Biegezugbruch
23	42800	96,7	4,46	0,351	17357		Biegeschubbruch in 3. Leimfuge v. unten
24	37570	84,9	3,91	0,438	13909		11. bis 5. Leimfuge rechts
Mittel	37860	85,6	3,94	0,421	14628	146000	Biegeschubbruch in Höhengmitte

Tab. 15 c) KAURESIN-verleimt und konditioniert in Heiß-Feucht-Klima

Träger-Nr.	$\max F$ (N)	$\max \sigma_B$ (N/mm ²)	$\max \tau_v$ (N/mm ²)	f (cm) bei 4000 N	E-Modul (N/mm ²)		Bruchbeschreibung
KHAYA							
25	27050	61,1	2,82	0,474	12853		Biegezugbruch
26	25370	57,3	2,64	0,509	11969		Biegezugbruch + Biegeschubbruch in d. 1.u.2.Lamelle v.unter
27	23780	53,7	2,48	0,497	12258		Biegezugbruch
28	24920	56,3	2,60	0,541	11261		Biegezugbruch
Mittel	25380	57,1	2,63	0,505	12085	12100	
ABACHI							
29	21230	48,0	2,21	0,724	8415		Biegezugbruch + Biegeschubbruch
30	21500	48,6	2,24	0,746	8166		Biegezugbruch + Biegeschubbruch
31	21110	47,7	2,20	0,799	7625		Biegezugbruch
32	21320	48,2	2,22	0,778	7831		Biegeschubbruch in 1.u.2. Leim- fuge von unten
Mittel	21290	48,1	2,22	0,762	8009	8000	
BUCHÉ							
33	27540	62,2	2,86	0,448	13599		Biegezugbruch u. etwas Biegeschubbr.
34	25020	56,5	2,61	0,539	11303		Biegeschubbruch in 2.u.3. Lamelle von unten + etwas Biegebr.
35	24470	55,3	2,55	0,536	11366		Biegeschubbruch in 1.u.2. Lamelle von unten + etwas Biegebr.
Mittel	25680	58,0	2,68	0,508	12089	12100	

d) KAURIT-verleimt und konditioniert in Heiß-Feucht-Klima

Träger-Nr.	$\max F$ (N)	$\max \sigma_B$ (N/mm ²)	$\max \tau_v$ (N/mm ²)	f (cm) bei 4000 N	E-Modul (N/mm ²)		Bruchbeschreibung
KHAYA							
37	27410	61,9	2,86	0,520	11716		Biegezugbruch
38	27500	62,2	2,87	0,488	13017		Biegezugbruch
39	26520	59,9	2,76	0,483	12613		Biegezugbruch
40	26290	59,4	2,74	0,507	12016		Biegezugbruch + etwas Biegeschub- bruch i.d.2.Lamelle v.unter
Mittel	26930	60,9	2,81	0,494	12341	12300	
ABACHI							
41	14400	32,6	1,50	0,755	8069		Biegeschubbruch in der 3. Leimfuge von oben
42	21270	48,1	2,22	0,750	8123		Biegezugbruch
43	19100	43,2	1,99	0,757	8048		Biegezugbruch
Mittel	18270	42,3	1,90	0,754	8080	8100	
BUCHÉ							
44	24990	56,5	2,60	0,461	13215		Biegeschubbruch in etwa 3. Leimfuge von unten
45	23740	53,7	2,47	0,463	13158		Biegeschubbruch + etwas Biegezugbruch
46	21020	47,5	2,19	0,575	10595		Biegeschubbruch in 3.u.4. Lamelle von unten
Mittel	23250	52,5	2,42	0,500	12323	12300	

7.5. Diskussion der Versuchsergebnisse

Um Vergleichsmöglichkeiten für die Biegefestigkeit von Brett-schichtträgern zu gewinnen, wurde eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der Prüfung von im Normalklima gelagerten Balken mit denen, die im Heiß-Feucht-Klima gelagert waren, vorgenommen.

Folgende Abminderungsquoten (Tabelle 16) wurden festgestellt:

Tabelle 16: Abminderung der Biegefestigkeiten (Mittelwerte) von Brettschichtträgern nach Klimatisierung im Heiß-Feucht-Klima gegenüber den Ergebnissen bei Normalklima

Holzart	Leimart	K l i m a				Feuchtigkeit bei Klima		Abminderung in % bei	
		normal		heiß-feucht		nor-mal	heiß-feucht		
		$\frac{\sigma_{B2}}{N/mm^2}$	$\frac{\tau_{02}}{N/mm^2}$	$\frac{\sigma_{B2}}{N/mm^2}$	$\frac{\tau_{02}}{N/mm^2}$	%	%	σ_B	τ_0
Khaya	Kauresin	68,5	3,16	57,1	2,63	13	21	17	17
Khaya	Kaurit	69,9	3,22	60,9	2,81	16	21	13	13
Abachi	Kauresin	56,1	2,59	48,1	2,22	15	22	14	14
Abachi	Kaurit	54,3	2,50	41,3	1,90	17	22	24	24
Buche	Kauresin	82,6	3,81	58,0	2,68	13	22	30	30
Buche	Kaurit	85,6	3,94	52,5	2,42	16	22	39	39

Die Werte zeigen eindeutig, daß die Balken, die dem Heiß-Feucht-Klima ausgesetzt waren, eine Festigkeitseinbuße gegenüber den im Normalklima gelagerten Balken erlitten hatten. Bei Buche stiegen die Abminderungsquoten sogar bis 39 %. Die ermittel-

ten Abminderungsquoten zeigen, daß, ähnlich wie bei Vollholz, auch bei verleimtem Brettschichtholz mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt die Festigkeiten entsprechend abfallen.

Die oben angegebenen Werte zeigen auch, daß die Holzfeuchtigkeit im Normalklima bei allen mit Kaurit verleimten Balken um 2 % bis 3 % höher lag als bei den mit Kauresin verleimten Balken. Dies ist darauf zurückzuführen, daß Kaurit-Leim mit einem erheblichen Anteil an Wasser aufbereitet wird. Das Holz nahm aus der Leimflotte Wasser auf, so daß auch nach längerer Lagerung der verleimten Balken im Normalklima bis zur Prüfung die Ausgleichsfeuchtigkeit noch nicht erreicht wurde.

Eine weitere Gegenüberstellung der verwendeten Leime für die Schichtholzverleimung zeigt Tabelle 17. Hier ist ersichtlich, daß einige σ_B -Werte der mit Kaurit verleimten Balken etwas größer sind als die Werte der mit Kauresin verleimten Balken, z.B.

	Kauresin	Kaurit
	σ_B (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)
Khaya (Normalklima)	68,5	69,9
Khaya (Heiß-Feucht-Klima)	57,1	60,9
Buche (Normalklima)	82,6	85,6

Statistische Untersuchungen ergaben jedoch, daß die Unterschiede der Mittelwerte nicht gesichert sind.

Tabelle 17: Vergleich der Biegefestigkeit der Schichtholzbalcken mit den Biegefestigkeiten der fehlerfreien Kleinproben sowie die Gegenüberstellung der verwendeten Leime für die Brettschichtverleimung

Holzart	Probe	Träger mit KAURESIN verleimt				Träger mit KAURIT verleimt			
		Feuchtigkeit (%)	σ_B (N/mm ²)	E-Modul (N/mm ²)	Probenzahl	Feuchtigkeit %	σ_B (N/mm ²)	E-Modul (N/mm ²)	Probenzahl
KHAYA	Verleimte Träger	NK 13 HFK 21	68,5 57,1	12700 12100	4 4	NK 16 HFK 21	69,9 60,9	13100 12300	4 4
	Kleinproben 1)	NK 12	83,8	10350	30	NK 12	83,8	10350	30
ABACHI	Verleimte Träger	NK 15 HFK 22	56,1 48,1	8300 8000	4 4	NK 17 HFK 22	54,3 41,3	8200 8100	4 3
	Kleinproben	NK 12	53,0	6850	30	NK 12	63,0	6850	30
BÜCHE	Verleimte Träger	NK 13 HFK 22	82,6 58,0	13500 12100	4 3	NK 16 HFK 22	85,6 52,5	14600 12300	4 3
	Kleinproben	-	-	-	-	-	-	-	-

NK = Normalklima

HFK = Heiß-Feucht-Klima

1) Bei den Kleinproben wurde σ_B aus $\sigma_{B||}$ und $\sigma_B \perp$ gemittelt

Einen Vergleich der Biegefestigkeit sowie der Schubfestigkeiten der verleimten Träger mit den Biege- und Scherfestigkeiten der fehlerfreien Kleinproben bei Normalklima zeigt die folgende Tabelle 18.

Tabelle 18: Abminderung der Biegefestigkeit beim Übergang von fehlerfreien Kleinproben auf große Biegebalken (Brettschichtträger), und Vergleich der Scherfestigkeiten der fehlerfreien Kleinproben mit den Schubfestigkeiten der Brettschichtträger (Normalklima)

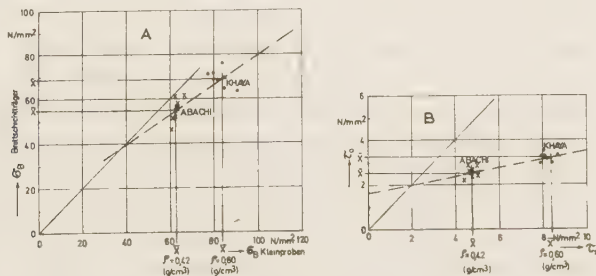
Probe	Biegefestigkeit					Scherfestigkeit bzw. Schubf. τ_0 (N/mm ²)	
	Bel.Richt bzw. Leimart	σ_B Abachi (N/mm ²)	Abmindr. (%)	σ_B Khaya (N/mm ²)	Abmindr. (%)	Abachi	Khaya
Kleinproben	Tangentia	59,9	12 %	79,6	17 %	4,7	τ_s 9,7
	Radial	66,0		87,9		4,8	8,5
Verleimte Träger	Kauresin	56,1	12 %	68,5	17 %	2,59	τ_0 3,16
	Kaurit	54,3		69,9		2,50	3,19

Man ersieht hieraus, wie sich beim Übergang von kleinen Proben auf größere Balken die Festigkeiten vermindern. Dabei muß beachtet werden, daß die Balken keine Vollholzbalken, sondern verleimte Brettschichtträger sind, die infolge der Verleimung bereits eine Vergütung erfahren haben. Daß die Biegefestigkeit mit abnehmender Probenabmessung größer wird, haben die Untersuchungen eindeutig ergeben. Diese Beobachtung wird von anderen Forschern ebenfalls bestätigt (SCHNEEWEISS, 1969, JOHNSON u. NEELY (1898).

Eine Gegenüberstellung der Biegefestigkeiten der fehlerfreien Kleinproben mit denen der verleimten Träger wurde außerdem zeichnerisch durchgeführt, indem jeweils die ge-

samte Anzahl der fehlerfreien Kleinproben in acht Gruppen unterteilt wurde. Hierbei wurde die 1., 9., 17.... Probe, die 2., 10., 18.... Probe usw. jeweils zu einer Gruppe zusammengefaßt. Da jeweils auch 8 Träger vorhanden waren, wurde dann jeweils der Mittelwert aus jeder der 8 Gruppen mit dem Festigkeitswert eines Balkens verglichen und zeichnerisch aufgetragen (Bild 51A). Durch die Schwerpunkte der beiden Punkthaufen wurde eine Gerade gelegt. Die Abweichung von der unter 45° verlaufenden Geraden ($\sigma_{\text{Großprobe}} = \sigma_{\text{Kleinprobe}}$) zeigt, daß mit zunehmender Rohdichte die Biegefestigkeit der Kleinproben gegenüber der Biegefestigkeit vergleichbarer Großproben immer stärker zunimmt.

Eine weitere Gegenüberstellung der Festigkeitseigenschaften von fehlerfreien Kleinproben und von Brettschichtträgern zeigt Bild 51B. Durch die Biegebelastung eines Balkens entstehen im Balken Querkräfte, die eine Schubbeanspruchung im Balken hervorrufen. Zur Ermittlung der Schubbruchsicherheit muß die Schubfestigkeit des Balkens bekannt sein. Es existiert jedoch noch keine direkte Methode für ihre Bestimmung an Hand von fehlerfreien Kleinproben. Deshalb wurde versucht, eine Beziehung zwischen der wesentlich einfacher zu bestimmenden Scherfestigkeit τ_s von fehlerfreien Kleinproben und der Schubfestigkeit τ_0 von Balken zu erhalten.



In Bild 51B sind jeweils zusammengehörende Festigkeitswert τ_0 und τ_s aufgetragen. Die τ_0 -Werte entsprechen den in Tabelle 15 zusammengestellten $\max \tau$ -Werten, die für die beim Bruch jeweils vorhandene Querkraft errechnet wurden.

Die Gleichung durch die Schwerpunkte der beiden Punktehaufen ergibt sich für beide Holzarten gemeinsam zu:

$$\max \tau \text{ Balken (N/mm}^2\text{)} = \tau_0 = 1,71 + 0,137 \cdot \tau_s \quad (15)$$

Die Quotienten $\tau_0 : \tau_s$ für die jeweiligen Mittelwerte ergeben sich nach Tabelle 18 mit

$$q_s = \frac{\tau_0}{\tau_s} \quad (16)$$

wie folgt:

$$q_s = \frac{2,54}{4,75} = 0,53 \text{ für Abachi}$$

$$q_s = \frac{3,19}{8,50} = 0,38 \text{ für Khaya}$$

Wie Bild 51B zeigt, sind die Abweichungen von der 45° -Linie ($\tau_0 = \tau_s$) wesentlich größer als bei den Biegefestigkeiten. Mit steigender Rohdichte nimmt die Scherfestigkeit τ_s der Kleinprobe ebenfalls viel stärker zu, als die entsprechende Schubfestigkeit τ_0 des Balkens, jedoch sind die Abweichungen noch wesentlich größer als bei den Biegefestigkeiten (Bild 51A).

8. Überlegungen zur Ableitung zulässiger Spannungen von tropischen Hölzern am Beispiel von Abachi und Khaya

8.1. Allgemeines

Wenn der Versuch gemacht wird, tropische Hölzer bei Baukonstruktionen in den Herkunftsländern einzusetzen, so führt dies auf die Notwendigkeit, sich Gedanken über die Sicherheit der Konstruktion zu machen, da es in diesen Ländern noch keine Normen zur Ausführung von Holzbaukonstruktionen aus tropischen Hölzern gibt. Es sind also Überlegungen zur Schaffung von Bemessungsgrundlagen anzustellen, welche die erforderlichen zulässigen Spannungen liefern, um die Tragfähigkeit unter einheimischen Bedingungen zu garantieren. Die Schaffung von für die Tropen gültigen Normen setzt langjährige Untersuchungen der in Frage kommenden tropischen Holzarten voraus. Die Versuchsergebnisse der beiden hier untersuchten Holzarten können als Grundlage für die Güteklassifizierung dieser tropischen Hölzer und damit als ersten Beitrag für eine künftige Normung angesehen werden.

Neben der Bestimmung zulässiger Spannungen wird dabei ins Auge gefaßt, die Klassifizierung mit Hilfe der maschinellen Holzsortierung durchzuführen, weil diese eine genauere Methode darstellt und, auf lange Sicht gesehen, wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Die Methode der maschinellen Holzsortierung wird in 8.8. eingehend erläutert.

Die Konstruktionen des Ingenieurholzbaues werden in der Regel immer noch nach dem Verfahren der zulässigen Spannungen bemessen, obwohl in anderen Baustoffbereichen immer häufiger die Berechnung nach Grenzzuständen bzw. nach der sog. Traglasttheorie durchgeführt wird. Mit diesem Verfahren werden die Grenzzustände hinsichtlich eines eventuellen mechanischen Versagens eines Tragwerkes sowie hinsichtlich dessen Gebrauchsfähigkeit, z.B. zu große Verformungen, definiert und den auftretenden Beanspruchungen des Tragwerkes gegenübergestellt, wobei ein bestimmter Sicherheitsabstand ein-

gehalten werden muß.

Die Bemessung nach Grenzzuständen erfordert aber die Kenntnis vieler Einflußgrößen, die bei den afrikanischen Bauhölzern jedoch noch lückenhaft ist. Im folgenden werden diese Einflußgrößen zwar zusammengestellt und ein dem Traglastverfahren ähnliches Bemessungsverfahren vorgeschlagen¹⁾. Im Hinblick auf den Stand der Technik in den afrikanischen Ländern wird jedoch zunächst ein System von zulässigen Spannungen eingeführt. Bei der Ableitung dieser zulässigen Spannungen für die einzelnen Beanspruchungsarten werden die nicht bestimmbar oder noch unbekannten Einflußgrößen geschätzt oder aus der Literatur entnommen.

8.2. Versagenskriterium

Wird als kennzeichnende Größe für den Beanspruchungszustand einer Konstruktion der entsprechende Spannungszustand gewählt, so darf beispielsweise bei einachsiger Beanspruchung die V -fache vorhandene Spannung $V \cdot \sigma_{\text{vorh}}$ bei Gebrauchslast die unter den gegebenen Umständen vorhandene Mindestbruchfestigkeit $k \cdot \bar{\sigma}_{\text{Bruch}}$ nicht überschreiten.

Als Versagenskriterium kann deshalb definiert werden:

$$V \cdot \sigma_{\text{vorh}} \leq k \cdot \bar{\sigma}_{\text{Bruch}} \quad (17)$$

Hierbei ist V das Produkt aller materialunabhängigen Sicherheitsfaktoren und k das Produkt aller materialabhängigen Einflußfaktoren, während $\bar{\sigma}_{\text{Bruch}}$ als Bezugsgröße den Mittelwert der jeweiligen Bruchfestigkeit von fehlerfreien Kleinproben unter statischer Beanspruchung darstellt. Die Größe $\bar{\sigma}_{\text{Bruch}}$ ist demnach eine Bezugsgröße, von der ein Teil der Einflußfaktoren k_i abhängen kann. Wird z.B. $\bar{\sigma}_{\text{Bruch}}$ als Mittelwert der Bruchfestigkeit unter Dauerbelastung definiert, so ist klar, daß der entsprechende Einflußfaktor $k_i = 1$ zu setzen ist.

¹⁾ Im Sinne des neuen Sicherheitskonzeptes handelt es sich um das sogenannte semi-probabilistische Verfahren (BREIT-SCHAFT, 1978).

Nach Definition gilt

$$V = \prod_{i=1...} V_i = V_1 \cdot V_2 \cdot V_3 \cdot \dots \quad (18)$$

$$k = \prod_{i=1...} k_i = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \dots \quad (19)$$

Das Symbol $\prod$ steht hierbei für "Produkt über alle". Es ist klar, daß jeder Faktor seinerseits wieder als Produkt von Unterfaktoren definiert werden kann, etwa $k_2 = \prod_{i=1...} k_{2i}$ usw.

8.3. Bemessungskriterium und Definition der zulässigen Spannung

Der rechnerische Spannungsnachweis nach irgendeiner Methode bei Annahme eines mehr oder minder zutreffenden mechanischen Modells liefert einen bestimmten Rechenwert σ_o (Nennwert) für die Spannung im gefährdeten Querschnitt der Konstruktion (rechnerische Nennspannung), der oft jedoch noch nicht alle Einflüsse auf den vorhandenen Spannungszustand erfaßt.

Sind diese Einflüsse in Form von Korrekturfaktoren m_i bekannt, so beträgt die tatsächlich vorhandene Spannung

$$\sigma_{\text{vorh}} = \frac{\sigma_o}{m} \leq \text{zul}\sigma \quad (20)$$

mit

$$m = \prod_{i=1...} m_i = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \dots \quad (21)$$

Die tatsächlich vorhandene Spannung darf also nicht größer als die zulässige Spannung werden. Der resultierende Korrekturfaktor m wurde in Gleichung (20) so eingeführt, daß Übereinstimmung mit der Definition von DUTKO (1969) gegeben ist.

Die zulässige Spannung $\text{zul}\sigma$ wird nun so festgelegt, daß der geforderte Sicherheitsabstand zur betreffenden Mindestbruchspannung eingehalten wird. Aus den Gleichungen (17) und (20) folgt die Definition der zulässigen Spannung damit in der Form

$$\text{zul}\sigma = \frac{k}{V} \cdot \bar{\sigma}_{\text{Bruch}} \quad (22)$$

Es gilt festzuhalten, daß die zulässige Spannung in Bezug auf einen Regelzustand abgeleitet wird, der mit Hilfe einer Bezugsgröße (hier $\bar{\sigma}_{\text{Bruch}}$ bei definierten Bedingungen) errechnet wird. Die Bezugsgröße ihrerseits wird in einem wohldefinierten Bezugszustand (hier Normalklima) bestimmt. Der Regelzustand ist jeweils zweckmäßig festzulegen. Die im folgenden abzuleitenden zulässigen Spannungen gelten für das in Ghana herrschende Heiß-Feucht-Klima, welches hier als Regelzustand definiert wird.

Etwasige Abweichungen hiervon können bei der Bemessung durch die Korrekturfaktoren m_1 berücksichtigt werden.

8.4. Die materialabhängigen Einflußfaktoren k_1

Diese berücksichtigen alle festigkeitsmindernden Einflüsse, die beim jeweiligen Versuch nicht berücksichtigt worden sind. Unterschiedlich sind die Meinungen einiger Forscher über die Bestimmung der einzelnen Einflußfaktoren, die sie für etwas übertrieben und willkürlich halten, so daß man z.B. im FOREST PRODUCTS RESEARCH LABORATORY in Princes Risborough, einfach aus Erfahrung, einen Wert von $k=1/3$ als Sicherheit (1 %-Fraktile bei Normalverteilung der Eigenschaftswerte) für alle festigkeitsmindernden Faktoren verwendet (SUNLEY und HUDSON, 1964).

Im FOREST PRODUCTS LABORATORY - US DEPARTMENT of AGRICULTURE setzt man alle abmindernden Faktoren zu $k=27/160 \approx 1/6$; dabei setzt man für die Festigkeit des reinen Holzes $3/4$ der mittleren Festigkeit der betrachteten Species, für den Dauerfestigkeitsbeiwert $9/16$, als Beiwert für Klima und andere ungünstige Situationen $2/3$, für den Ästigkeitsbeiwert $3/5$, so daß für k ein Wert von $3/4 \times 9/16 \times 2/3 \times 3/5 = 27/160 \approx 1/6 \approx 0,17$ folgt (WOOD und TASKER, 1957). In ähnlicher Weise wird hier der Einflußfaktor k bestimmt. Wie bereits erwähnt, sind die k_1 abhängig davon, unter welchen Versuchsbedingungen die Bezugsgröße $\bar{\sigma}_{\text{Bruch}}$ ermittelt wurde. In vorliegender Arbeit wurde $\bar{\sigma}_{\text{Bruch}}$ als Mittelwert der Bruchfestigkeit von fehlerfreien Kleinproben unter statischer Kurzzeit-Beanspruchung

im Normalklima bestimmt. Als Bezugszustand werden also die Bedingungen im Normalklima definiert. Damit ist klar, daß Einflußfaktoren u.a. im Hinblick auf etwaige Holzfehler und dauernd wirkende Lasten eingeführt werden müssen. Die Einflußfaktoren k_i können durch zusätzliche Versuche ermittelt werden. Im folgenden werden die Einflußfaktoren besprochen und entsprechende Zahlenwerte entweder aufgrund der durchgeführten Versuche abgeleitet oder dem einschlägigen Schrifttum entnommen.

Der resultierende materialabhängige Einflußfaktor k wird in der Form

$$k = k_D \cdot k_H \cdot k_{ut} \cdot k_M \quad (23)$$

angesetzt. Hierbei bedeuten:

k_D : Einflußfaktor für dauernd wirkende Lasten.

Die Erfahrung hat ergeben, daß durch längere Belastung eines Bauwerkes mit einem Festigkeitsabfall der betroffenen Baustoffe zu rechnen ist. Da aber Versuche an fehlerfreien Kleinproben nur Kurzzeitversuche sind und nur ca. 1 bis 5 min. dauern, während Bauwerke in der Praxis einige Jahrzehnte stehen, muß der Wert der mittleren Festigkeit mit einem Zeitfaktor versehen werden. Es ist bekannt, daß die Festigkeit des Holzes infolge einer Dauerlast im Laufe der Zeit bis auf etwa 55 % bis 60 % absinken kann. Empfohlen wird hier nach WOOD und TASKER (1957) ein Abminderungsfaktor von $9/16 = 0,56$, d.h., die Kurzzeitfestigkeit fehlerfreier Kleinproben muß mit dem Faktor

$$k_D = 0,56$$

reduziert werden. Dieser Wert wird gleichermaßen für die Biege-, Scher- und Bindefestigkeit sowie die Druck- und Zugfestigkeit angesetzt.

Hier ist erwähnenswert, daß MADSON (1975) bei Torionsversuchen eine Abhängigkeit der Dauerfestigkeit von der Festigkeit des Holzes beobachtet hat, d.h., der Zeiteinfluß war umso geringer, je geringer die Festigkeit des Holzes infolge von Holzfehlern wie Ästen usw. war.

k_H : Einflußfaktor für Holzfehler bzw. für den Übergang von Klein- zu Großproben. Beim Übergang von fehlerfreien Kleinproben auf große Biegebalken wurde in vorliegenden Versuchen eine mittlere Abminderung der Biegefestigkeit von max 12 % bei Abachi und 17 % bei Khaya festgestellt (siehe Tabelle 18). Es muß jedoch bedacht werden, daß die Balken keine Vollholzbalken, sondern verleimte Brettschichtträger sind, die bereits eine gewisse Vergütung aufweisen. Ein Beiwert der Vergütung von mindestens 1,12 aufgrund der acht verleimten Lamellen wird, ähnlich dem Vorschlag von DUTKO (1969), Tabelle XI, berücksichtigt. Somit werden endgültig für die Biegefestigkeit folgende k_H -Werte berechnet:

- 1) $k_H \text{ Biegung} = 1 - 0,12 \cdot 1,12 = 0,87$ für Abachi
- $k_H \text{ Biegung} = 1 - 0,17 \cdot 1,12 = 0,81$ für Khaya.

Wie bereits unter 7.5. diskutiert, kann mit Hilfe der Gleichung (15) von der Scherfestigkeit T_s kleiner fehlerfreier Proben auf die entsprechende Schubfestigkeit T_o von Brettschichtträgern geschlossen werden. Da als Bezugsgröße zur Ableitung zulässiger Spannungen die Festigkeit der fehlerfreien Kleinprobe festgelegt wurde, kann für den k_H -Wert bei Schubbeanspruchung der bereits mit Gleichung (16) (vgl. 7.5.) ermittelte q_s -Wert herangezogen werden. Damit ergibt sich

$$k_H \text{ Schub infolge Biegung} = q_s = 0,53 \text{ Abachi}$$

$$k_H \text{ Schub infolge Biegung} = q_s = 0,38 \text{ Khaya.}$$

Bezüglich der Bindefestigkeit, d.h., bei Beanspruchung auf Abscheren in der Leimfuge, kann zur Festlegung eines entsprechenden k_H -Wertes angenommen werden, daß die Beanspruchung der Leimfuge in fehlerfreien Kleinproben sich nicht wesentlich von derjenigen im Brettschichtträger unterschei-

1) Da die Biegebalken relativ fehlerfrei waren, kann k_H auch als Formfaktor m_{12} für den Übergang von Kleinproben zu Großproben aufgefaßt werden (vgl. 8.7.).

det, falls Beanspruchungen senkrecht zur Leimfläche in Form von Druck- oder Zugspannungen vernachlässigt werden können. Darüber hinaus sind Einflüsse etwaiger Fehlverleimungen bereits durch den obigen Wert abgedeckt. Damit kann bei Abscheren in der Leimfuge $k_H = 1$ gesetzt werden; die k_H -Werte sind in Tabelle 19 zusammengestellt.

Tabelle 19: Einflußfaktoren k_H

Beanspruchungsart	Holzart	
	Abachi	Khaya
Biegung	0,87	0,81
Schub infolge Biegung	0,53	0,38
Abscheren i.d.Leimfuge	1,00	1,00

k_{ut} : Einflußfaktor für Feuchtigkeits- und Temperatureinflüsse

An Hand der hier durchgeführten Versuche an Brettschichtträgern wurden die Meßergebnisse der im Normalklima klimatisierten Träger mit denen derjenigen Träger verglichen, die einem Heiß-Feucht-Klima (ähnlich dem in Ghana) ausgesetzt waren. Betrachtet werden die unter 7.5., Tabelle 16 diskutierten Festigkeitsverluste der Brettschichtträger im Heiß-Feucht-Klima. Der höchste Festigkeitsabfall mit 24 % (außer Buche) und somit auch die ungünstigste Situation für die beiden tropischen Hölzer trat bei der Abachi-Kaurit-Verleimung auf, so daß sich hier z.B. $k_{ut} = 1 - 0,24 = 0,76$ ergibt. In Bezug auf die Leimart wird der jeweils ungünstigste Abminderungswert genommen. Im einzelnen ergeben sich aus Tabelle 16 und 13 (Behandlungsart 20 gegenüber 10), die in Tabelle 20 zusammengestellten Einflußfaktoren k_{ut} .

Tabelle 20: Einflußfaktoren k_{ut}

Beanspruchungsart	Holzart	
	Abachi	Khaya
Biegung, Schub infolge Biegung	0,76	0,83
Abscheren i. Leimfuge	0,77	0,62

Für die fehlerfreien Kleinproben, deren Festigkeiten als Bezugsgrößen definiert sind, werden die gleichen Einflußfaktoren k_{ut} angenommen.

k_M : Einflußfaktor für die natürliche Verteilung (Streuung) der Festigkeit (Mindestbruchfestigkeit)

Aufgrund unterschiedlicher Streuung der Eigenschaftswerte jeder Holzart ergibt sich jeweils eine bestimmte Verteilung dieser Eigenschaftswerte, weshalb für die Festigkeit ein Schrankenwert festgelegt werden muß, der niedriger ist, als die Festigkeit der meisten Einzelproben. Wenn die Festigkeit von 5 % aller Proben unter diesem Schrankenwert liegt, spricht man von 5 % Fraktile. Neben der 5 % - Fraktile wird zuweilen auch die 1 % - Fraktile berechnet. Allgemein kann beim Vorliegen einer normalverteilten Festigkeitseigenschaft, wie hier vorhanden (vgl. 8.8.2.), dieser Schrankenwert in der Form

$$\begin{aligned} \min \sigma_{\text{Bruch}} &= \bar{\sigma}_{\text{Bruch}} - z \cdot s \\ &= k_M \cdot \bar{\sigma}_{\text{Bruch}} \end{aligned} \quad (20)$$

definiert werden mit

$$k_M = 1 - z \cdot V_x.$$

Hierin bedeuten: $\bar{\sigma}_{\text{Bruch}}$: Mittelwert der Bruchfestigkeit im statischen Kurzzeitversuch (Bezugsgröße) im Normalklima (Bezugszustand)

z : Einseitiger Schrankenwert der Standardnormalverteilung

$z = 1,64$ bei 5 %-Fraktile (vgl. SACHS, 1973)

$z = 2,33$ bei 1 %-Fraktile

s : Standardabweichung

V_x : Variationskoeffizient

Wie im Holzbau üblich geworden, wird hier die 5 %-Fraktile zugrunde gelegt.

Weiter sollte berücksichtigt werden, daß kleine Ungenauigkeiten bei der Mittelwertbestimmung nicht ausgeschlossen werden können, z.B. wegen zufälliger Ungenauigkeiten des Prüfgerätes oder der Versuchsdurchführung. Diese mögliche Ungenauigkeit wird mit einem weiteren Fehlerkoeffizienten von 5 % geschätzt (NOACK, 1971). Damit reduziert sich der k_M -Wert der 5 %-Fraktile um weitere 5 %. Es bleibt dann

$$k_M = 1 - z \cdot V_x - 0,05. \quad (25)$$

Mit den Variationskoeffizienten nach Tabelle 7 und 13 (Behandlungsart 10) ergeben sich die in Tabelle 21 zusammengestellten Einflußfaktoren k_M .

Tabelle 21: Einflußfaktoren k_M

Beanspruchungsart	Holzart	
	Abachi	Khaya
Biegung	0,81	0,80
Schub infolge Biegung	0,72	0,70
Abscheren i.d.Leimfuge	0,60	0,64

8.5. Die materialunabhängigen Sicherheitsfaktoren V_1

Diese berücksichtigen Sicherheitszuschläge z.B. gegen Überbelastung (V_1) u.ä. (vgl. CIZEK, 1961). Weiter können die wirtschaftlichen Folgen etwaiger Schadensereignisse sowie die Gefährdung von Mensch und Tier je nach Bedarf mit unterschiedlichen Gewichten berücksichtigt werden (V_2).

Schließlich kann ein sog. Humanfaktor (V_3) angesetzt werden, der die Qualität der Ausführung einer Konstruktion, die Zuverlässigkeit in der Berechnung derselben sowie das

Niveau des Standes der Technik in dem betreffenden Lande berücksichtigt. Hier spielt auch die Zuverlässigkeit bei der Holzsortierung eine entscheidende Rolle.

V_1 : Soll die Sicherheit gegen Überbelastung 1,25 betragen, so ist $V_1 = 1,25$. Diesen Wert hat CIZEK (1961) vorgeschlagen.

NOACK (1971) setzt als Sicherheitsabstand bei Gefährdung von Mensch und Tier einen V_2 -Wert von ca. 1,2 an.

Hier wird $V_2 = 1,2$ übernommen.

V_3 : Für europäische Verhältnisse gilt etwa $V_3 = 1,3$ (NOACK, 1971). In Anbetracht der Tatsache, daß die Qualität der Ausführung sowie der Stand der Technik in den afrikanischen Ländern niedriger liegen dürfte als in Europa und den USA scheint es notwendig, eine weitere Erhöhung des Sicherheitsfaktors V_3 vorzunehmen. Wenn man annimmt, daß infolge einer besseren Ausführungsqualität in Europa die Tragfähigkeit (5 %-Fraktile) etwa 40 % höher sein wird als z.B. in Ghana, so muß man V_3 auf

$$1,3 \cdot 140/100 = 1,82$$

erhöhen.

Damit folgt für den materialunabhängigen Sicherheitsfaktor nach Gleichung (18)

$$V = 1,25 \cdot 1,2 \cdot 1,82 = 2,73.$$

8.6. Vorschlag für pauschale zulässige Spannungen für Abachi und Khaya

Da eine Unterscheidung in Güteklassen für tropische Hölzer für Bauzwecke nicht existiert und darüber hinaus die Qualität dieser Hölzer relativ gleichmäßig ist, so daß eine solche Unterscheidung zunächst nicht notwendig erscheint, wird vorgeschlagen, die zulässigen Spannungen in Bauholz als auch

in Brettschichtträgern einheitlich festzulegen.

8.6.1. Zulässige Spannungen für Biege- und Schubbeanspruchung

Mit den ermittelten k_i -Werten ergibt die Auswertung von Gleichung (23) mit Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors $V = 2,73$, die in Tabelle 22 zusammengestellten resultierenden Abminderungsfaktoren k/V .

Tabelle 22: Ermittlung der resultierenden Abminderungsfaktoren k/V

Beanspruchung	Einflußfaktoren							resultier. Abmind.Fakt. k/V	
	k_D	k_H		k_{ut}		k_M			
	Abachi u. Khaya	Abachi	Khaya	Abachi	Khaya	Abachi	Khaya	Abachi	Khaya
Biegung	0,56	0,87	0,81	0,76	0,83	0,81	0,80	0,110	0,110
Schub infolge Biegung	0,56	0,53	0,38	0,76	0,83	0,72	0,70	0,059	0,045
Abscheeren i.d. Leimfuge	0,56	1,00	1,00	0,77	0,62	0,60	0,64	0,095	0,081

Mit den mittleren Biege- und Kreuzscherfestigkeiten nach Tabelle 7 ergeben sich mit den Abminderungsfaktoren k/V nach Tabelle 22 aus Gleichung (22) die in Tabelle 23 zusammengestellten zulässigen Spannungen für Abachi und Khaya für die Beanspruchungsarten Biegung und Schub infolge Biegung (Zul $\sigma_B = \frac{k}{V} \cdot \bar{\sigma}_{\text{Bruch}}$).

Tabelle 23: Vorschlag für pauschale zulässige Spannungen im tropischen Klima bei Biege- und Schubbeanspruchung für Abachi und Khaya

Holzart	Biegung (N/mm ²)	Schub infolge Biegung (N/mm ²)
Abachi	7	0,3
Khaya	9	0,4

Wie ersichtlich, beträgt die vorgeschlagene zulässige Biegespannung etwa $1/9$ der mittleren Biegefestigkeit der fehlerfreien Kleinproben.

Der wesentlich höhere Sicherheitswert bei Schubbeanspruchung ist in dieser Höhe nur als formaler Rechenwert zu betrachten, da als Bezugsgröße die Kreuzscherfestigkeit der fehlerfreien Kleinprobe herangezogen wurde.

Die zulässige Beanspruchung für Abscheren in der Leimfuge ergeben sich analog mit den Bindefestigkeiten nach Tabelle 13 (Behandlungsart 10) zu

$$\text{zul}\tau_B = 0,095 \cdot 5,69 \approx 0,5 \text{ N/mm}^2 \text{ für Abachi und}$$

$$\text{zul}\tau_B = 0,081 \cdot 9,72 \approx 0,8 \text{ N/mm}^2 \text{ für Khaya.}$$

Ein Vergleich mit den zulässigen Schubspannungen nach Tabelle 23 zeigt, daß die Leimfuge für die Bemessung der hier untersuchten 2 m langen Balken nicht maßgebend wird. Bei gedrungenem Träger kann jedoch auf Grund der erhöhten Schubbeanspruchung ein Schubnachweis im Holz erforderlich sein.

8.6.2. Zulässige Spannungen für Druck- und Zugbeanspruchung

Da Versuche an Großproben für diese Belastungsfälle nicht durchgeführt werden konnten, werden, soweit sinnvoll, die bereits abgeleiteten Einflußfaktoren verwendet, um wenigstens Anhaltspunkte für die Bemessung von Druck- bzw. Zuggliedern zu erhalten.

Der Einfluß der Holzfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit geht aus Tabelle 9 hervor. Gegenüber dem Normalklima ergibt sich danach für Abachi sowie für Khaya eine Abminderung um 35 %.

Damit

$$k_{ut} = 1 - 0,35 = 0,65 \quad \text{für Achei und Khaya.}$$

Dieser Wert wird auch für die Zugfestigkeit angenommen.

Der Einfluß der Streuung ergibt sich nach Tabelle 7 und Gleichung (25) für die 5 %-Fraktile zu

$$k_M(\text{Druck}) = 1 - 1,64 \cdot 0,071 - 0,05 = 0,83 \quad \text{Abachi u. Khaya}$$

$$k_M(\text{Zug}) = 1 - 1,64 \cdot 0,210 - 0,05 = 0,61 \quad \text{Abachi}$$

$$k_M(\text{Zug}) = 1 - 1,64 \cdot 0,196 - 0,05 = 0,63 \quad \text{Khaya}$$

Dabei wurde wie in 8.4. noch ein Abschlag für Ungenauigkeiten von 0,05 berücksichtigt. Alle anderen Einflußfaktoren werden aus 8.4. wie für Biegung übernommen. Damit ergibt sich:

$$k_{\text{Druck}} = 0,56 \cdot 0,87 \cdot 0,65 \cdot 0,83 = 0,26 \quad \text{Abachi}$$

$$k_{\text{Druck}} = 0,56 \cdot 0,81 \cdot 0,65 \cdot 0,83 = 0,24 \quad \text{Khaya}$$

$$k_{\text{Zug}} = 0,56 \cdot 0,87 \cdot 0,65 \cdot 0,61 = 0,19 \quad \text{Abachi}$$

$$k_{\text{Zug}} = 0,56 \cdot 0,81 \cdot 0,65 \cdot 0,63 = 0,19 \quad \text{Khaya}$$

Aus der Gleichung (22) folgt damit mit den Sicherheitsfaktoren nach 8.5. für die zulässige Druck- bzw. Zugspannung mit den Mittelwerten nach Tabelle 7:

$$\text{Abachi: } \text{zul } \sigma_D = \frac{0,26}{2,73} \cdot 35,8 = 3,41 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{zul } \sigma_Z = \frac{0,19}{2,73} \cdot 79,0 = 5,49 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Khaya: } \text{zul } \sigma_D = \frac{0,24}{2,73} \cdot 48,4 = 4,25 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{zul } \sigma_Z = \frac{0,19}{2,73} \cdot 97,4 = 6,78 \text{ N/mm}^2$$

Die ermittelten Werte sind in Tabelle 24 wiedergegeben.

Tabelle 24: Vorschlag für pauschale zulässige Spannungen im tropischen Klima bei Druck- und Zugbeanspruchung für Abachi und Khaya

Holzart	Druck (N/mm ²)	Zug
Abachi	3	5
Khaya	4	7

Da der Ableitung der zulässigen Zugspannung der k_H -Wert von relativ astfreien Brettschichtträgern zugrunde gelegt wurde, ist bei Ausnützung der zulässigen Zugspannung ebenfalls ast-freies Holz zu verwenden. Andernfalls müssen weitere, noch zu bestimmende Abminderungsfaktoren berücksichtigt werden (vgl. Gl. 31 b).

8.7. Die Korrekturfaktoren m_1 für den Spannungsnachweis

Für den rechnerischen Spannungsnachweis von verleimten Biegeträgern oder Vollholzbalken ist es notwendig, alle weiteren Einflüsse zu berücksichtigen, die aus der Geometrie des Bauteils, den Herstellungsbedingungen, den Abweichungen vom zugrunde gelegten Regelklima (hier Heiß-Feucht-Klima) usw. resultieren. Insbesondere können alle von den definierten Regelzuständen abweichenden Zustände je nach Auftreten berücksichtigt werden. Diese Faktoren werden hier als Korrekturfaktoren m_1 bezeichnet (vgl. Gleichung 21).

Mit der unter 8.6. definierten Spannung muß dann der Nachweis erbracht werden, daß allgemein

$$\sigma_{\text{vorh}} = \frac{\sigma_0}{m} \leq \text{zul } \sigma$$

eingehalten wird (vgl. Gleichung 20).

Es bedeuten:

σ_0 = rechnerische Nenn-Spannung
z.B. Biegung ist $\sigma_0 = M/W$, $\tau_0 = 1,5 Q/A$ usw.

mit M = Biegemoment im gefährdeten Querschnitt

Q = Querkraft

W = Widerstandsmoment des Balkenquerschnitts

A = Balkenquerschnitt

σ_{vorh} = tatsächlich vorhandene Spannung

$m = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \dots$ resultierender Korrekturfaktor nach Gleichung (21).

Da es nicht Ziel der vorliegenden Arbeit war, die unterschiedlichsten Einflüsse auf den Spannungszustand in einem Bauteil zu untersuchen, sollen nachfolgend nur einige der möglichen Korrekturfaktoren m_1 kurz genannt werden.

m_1 : Faktor, der die Geometrie des Balkens berücksichtigt,
z.B. Krümmungen, Querschnittshöhe und -form, Kerben usw. (vgl. DUTKO, 1969).

Dieser Faktor ist auch als Formfaktor bekannt und wird hier als Produkt seiner Unterfaktoren definiert wie folgt:

$$m_1 = m_{11} \cdot m_{12} \cdot m_{13}$$

wobei m_{11} = Krümmungsfaktor bei Bogentragwerken
 m_{12} = Faktor für Querschnittshöhe bzw. -form
 m_{13} = Kerbfaktor.

m_{11} : Nach DUTKO (1969) kommt nur eine die Tragfähigkeit vermindern-
 de zusätzliche Spannung zustande, wenn der Krümmungsradius der einzelnen
 Lamelle $< R = 250 \cdot d$ ist, wobei R = Krümmungsradius der neutralen Faser,
 d = Lamellendicke.

Nach DUTKO (1969) variiert m_{11} im Bereich $0,85 \leq m_{11} \leq 1,0$ für
 bezogene Krümmung $1/125 \geq d/R \geq 1/250$.

m_{12} : Es ist bekannt, daß die Festigkeit von Balken mit zunehmender
 Querschnittshöhe abnimmt (vgl. DUTKO, 1969). Unter 8.4. wurde erwähnt,
 daß der k_H -Wert hier wegen der relativen Fehlerfreiheit der geprüften
 Balken auch als Formfaktor aufgefaßt werden kann. Die abgeleiteten zuläs-
 sigen Biege- und Schubspannungen beziehen sich auf den Regelzustand
 $h=12$ cm, d.h., $m_{12}(12) = 1$. Formel 17 von DUTKO (1969) wird
 deshalb entsprechend umgerechnet. Es ergibt sich für Recheckquerschnitte
 damit näherungsweise die Formel 26, die auch in Bild 52 dargestellt ist.

$$m_{12} = m_{12}(h) = 0,67 \cdot \frac{h^2 + 922}{h^2 + 567} \quad (26)$$

h = Querschnittshöhe in cm

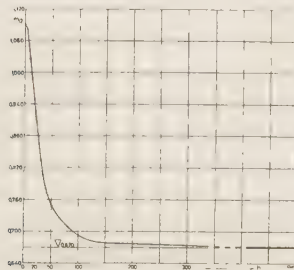


Bild 52: Einfluß der Querschnittshöhe auf den Korrekturfaktor m_{12}

m_{13} : Bei Querschnittschwächung wie z.B. durch Löcher, Ausklinkung usw. treten zum Teil beträchtliche Spannungserhöhungen auf (Kerbspannungen), wie HENRICI (1975) aufgrund von spannungsoptischen Versuchen festgestellt hat. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die dort eingeführten Kerbfaktoren die reziproken Werte des hier definierten m_{13} -Wertes darstellen.

m_2 : Faktor, der die Ausführungsart charakterisiert wie z.B. Lamellenstöße, Preßdruck und Preßdauer, Leimart, Art und Qualität der Vortrocknung der zu verleimenden Brettlamellen usw.; m_2 kann demnach wieder als Produkt von Unterfaktoren definiert werden. Diese müssen im einzelnen je nach Situation festgelegt oder in besonderen Untersuchungen, insbesondere mit Rücksicht auf die Verhältnisse im tropischen Klima, bestimmt werden.

m_3 : Faktor, der klimatische Einflüsse berücksichtigt, soweit diese von dem zugrunde gelegten Regelzustand (Heiß-Feucht-Konstant-Klima) abweichen. Falls das Bauteil sich ständig in einer dem Normalklima ähnlichen Umgebung befindet, kann $m_3 = 1/k_{ut}$ (vgl. 8.4.) eingesetzt werden.

Weitere Korrekturfaktoren für den Einfluß von unterschiedlich lange wirkenden Lasten bei Lastkombinationen, von Formfaktoren bei gegliederten Querschnitten usw. können der Arbeit von DUTKO (1969) entnommen werden.

8.8. Differenzierte Bestimmung von zulässigen Biegespannungen mit Hilfe der maschinellen Holzsortierung (Bemessungsgerade)

8.8.1. Allgemeines

Seitdem nachgewiesen wurde, daß zwischen dem E-Modul eines Holzes und einigen anderen Festigkeitswerten wie z.B. der Biegefestigkeit, Zugfestigkeit oder Druckfestigkeit eine signifikante Beziehung existiert, liegt es nahe, diese Beziehung für eine maschinelle Festigkeitsklassifizierung zu verwenden (CURRY und TORY, 1976). Neuerdings laufen auch Versuche mit

dem Ziel, Resonanz- und Ultraschallverfahren sowie Durchstrahlungsmethoden einzusetzen (vgl. PASCHALIS, 1978, HENKEL, M., 1972 und KELLER, R., 1971). Die gebräuchlichste Methode des Holzklassifizierung ist aber immer noch in den meisten Ländern die visuelle Sortierung, wobei nach Zahl und Größe der Äste, der Faserabweichung, der Menge der auftretenden Risse usw. geurteilt wird. Da diese Sortierung aber visuell durchgeführt wird und damit subjektiv ist, hängt das Ergebnis stark von der fachlichen Qualifikation des Sortierers ab.

Schon um das Jahr 1912 wurde der Einfluß von Ästen auf den E-Modul bekannt (CLINE und HEIM, 1912). Die Anwendung dieser Erkenntnisse über die Korrelation zwischen Ästigkeit und E-Modul für die Holzklassifizierung erfolgte aber erst, als man gegen Ende der fünfziger Jahre in den USA weitere Untersuchungen in dieser Richtung durchführte (SENF, SUDDARTH, und ANGGLETON, 1962). Die Folgerungen aus diesen Untersuchungen und Überlegungen führten zu dem Entschluß, eine Maschine zu entwickeln, welche über die Messung der Durchbiegung f , die Steifigkeit, d.h. das Produkt aus E-Modul und Trägheitsmoment eines Brettes schnell und genau durch ein zerstörungsfreies Verfahren zu bestimmen erlaubt. Bei der Herstellung von Brettschichtträgern kann dieses Verfahren von großem Nutzen sein, da man Bretter der geringwertigeren Güteklasse in der neutralen Zone, d.h. in den weniger beanspruchten Bereich einfügt. Dieses Verfahren ist wirtschaftlich und gewährleistet gleichzeitig eine optimale Festigkeit des Balkens.

KUFNER (1977) hält für tropische Hölzer die maschinelle Sortierung für besonders vorteilhaft, da damit auch die für tropische Hölzer charakteristischen Wuchseigenschaften wie Drehwüchsigkeit, die sich der visuellen Sortierung oft entzieht, erfaßt werden können.

Drei solche, zur Zeit industriell hergestellte Maschinen sind die Stress-O-Matic, Computermatic und der Continous-Lumber-Tester.

Bei dieser maschinellen Festigkeitssortierung oder englisch "Mechanical Stress Grading" werden die Lamellen zum Aufbau des Brettschichtträgers einzeln in der Maschine geprüft, wobei sie im Durchlaufverfahren auf Biegung beansprucht werden. Ein Prozeßrechner ermittelt aus der gemessenen Durchbiegung f die Biegesteifigkeit $E \cdot I$ und steuert die Sortierung der Hölzer.

Diese Methode der maschinellen Sortierung ist insofern sehr vorteilhaft, weil damit die Beanspruchung über einzelne Abschnitte des Holzes erfolgt, so daß es fast vollständig beurteilt werden kann. Ein Mangel besteht jedoch darin, daß die Maschine, die nach dem System der Biegung auf zwei Stützen arbeitet, nicht in der Lage ist, Anfang und Ende des Holzes zu prüfen.

Weitere Nachteile sind:

- 1) Die Tatsache, daß nur Hölzer mit verhältnismäßig kleinen Querschnittsabmessungen in die Maschine hineinpassen. Bei der Computermatic sind es z.B. bis zu 76 mm Dicke und bei dem Continous-Lumber-Tester sogar nur bis zu 38 mm (PELLERRIN, 1976; MÜLLER, 1968). Für Brettschichtträger ist dies jedoch kein Hindernis, weil die Lamellendicke von 40 mm normalerweise nicht überschritten wird.
- 2) Bei einmaligem Durchlauf wird eine Seite auf Zug und die andere auf Druck beansprucht. Infolge der Belastung des Holzes auf einer Seite entsteht ein Bogen, so daß das Holz um 180° um die Längsachse gedreht und noch einmal in die Maschine eingeführt werden muß, um eine zuverlässige Sortierung zu erreichen. Dieser Nachteil besteht bei dem Continous-Lumber-Tester nicht, da hier die Belastung bei einem Durchlauf nacheinander auf beiden Seiten des Holzbrettes erfolgt.
- 3) Vor der Prüfung mit der Stress-Grading-Maschine muß das Holz gehobelt werden, damit eine gleichmäßige Berührung zwischen Maschine und Holz entsteht.

- 4) Ein nicht unwesentlicher Nachteil ist, daß die Lamelle in der Maschine auf Biegung (Träger auf zwei Stützen) beansprucht wird, während die Lamelle im fertigen Balken jedoch überwiegend auf Längskraft (Druck oder Zug) belastet wird.
- 5) Letztlich ist der Kostenfaktor der Maschine ein Problem. Betrachtet man jedoch nachfolgende Tabelle 25, so ergibt sich, daß infolge der hohen Ausbeute bei der maschinellen Sortierung im Endeffekt die Anschaffungskosten der Maschine sich bezahlt machen.

Tabelle 25: Beispiele für die Ausbeute in den einzelnen Sortierungsklassen aus dem gesamten Sortiment nach ENDERSBY (1974)

Holzart	Sortierv Verfahren	Güteklasse nach Vorschlag von Princes R'borough Lab.		
		M 75 %	M 50 %	Ausschuß %
Scots pine	visuell	6	40	54
	maschinell	70	23	7
Sitka- pruce	visuell	4	34	62
	maschinell	83	15	2
Douglas fir	visuell	3	26	71
	maschinell	14	43	43

Als Grundlage für die Bestimmung der zulässigen Spannung mit Hilfe der maschinellen Sortierung wird eine sogenannte Bemessungsgerade eingeführt, mit welcher die Lamellen klassifiziert werden können. Die Bestimmung einer solchen Bemessungsgeraden beruht auf

- 1) der Bestimmung der Festigkeitseigenschaften der Holzarten an Hand von fehlerfreien Kleinproben unter statischer Beanspruchung;
- 2) dem Bestehen einer ausreichenden Korrelation zwischen den Eigenschaftswerten und

- 3) der Ableitung von entsprechenden Einfluß - und Sicherheitsfaktoren.

Bei vielen Untersuchungsverfahren der mathematischen Statistik wird vorausgesetzt, daß die untersuchte Stichprobe einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammt. Zunächst wird daher der Nachweis geführt, daß die besonders wichtige Biegefestigkeit σ_B näherungsweise als normalverteilt angenommen werden kann.

8.8.2. Test auf Normalverteilung der Biegefestigkeit σ_B

Dieser kann entweder mit dem sogenannten Chi-Quadrat-Test oder an Hand des Wahrscheinlichkeitspapiers (Bild 53a) durchgeführt werden (RACKWITZ, 1961). Im vorliegenden Fall wird das letztere Verfahren gewählt.

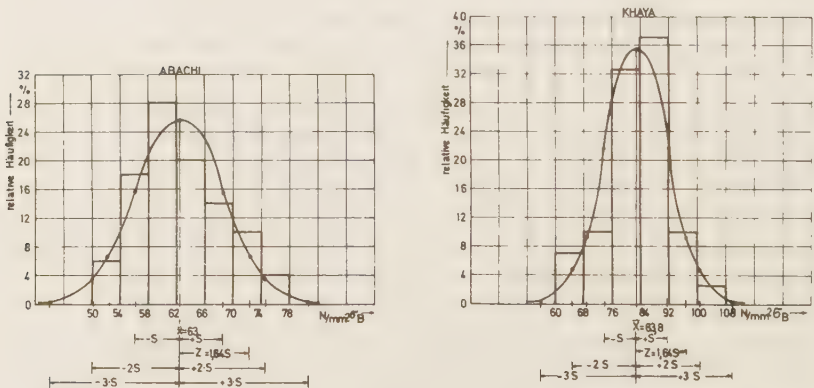


Bild 53: Häufigkeitsverteilung für die Biegefestigkeit von Abachi und Khaya

Bild 53 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Biegefestigkeiten fehlerfreier Kleinproben von Abachi und Khaya. Beim Verfahren mit dem Wahrscheinlichkeitspapier wird die Ordinate, welche

die Häufigkeitssumme der entsprechenden Zufallsgröße darstellt, so verzerrt, daß die Summenkurve der Gauß'schen Verteilungsfunktion eine Gerade darstellt. Dabei rücken die Punkte für 0 % und 100 % relative Häufigkeit ins Unendliche. Hierzu wurden besondere Papiere entwickelt, auf denen alle Versuchswerte aufgetragen werden müssen (Bild 53a).

Liegen die Punkte annähernd auf einer Geraden, kann die Stichprobe und somit auch die Grundgesamtheit näherungsweise als normal verteilt angenommen werden. Bei einer symmetrischen Verteilung müssen jeweils 50 % aller Werte links bzw. rechts vom Mittelwert liegen. Der Mittelwert muß also dort liegen, wo die Gerade die Linie der Summenhäufigkeit 50 % schneidet. Aus Bild 53a ergibt sich für Abachi $\bar{\sigma}_B = 62,5 \text{ N/mm}^2$ und für Khaya $\bar{\sigma}_B = 83 \text{ N/mm}^2$, was gut mit den Tafelwerten nach Tabelle 7 übereinstimmt. Aus Bild 53a ergibt sich somit, daß die Biegefestigkeiten fehlerfreier Kleinproben von Abachi und Khaya als normal verteilt angenommen werden können.

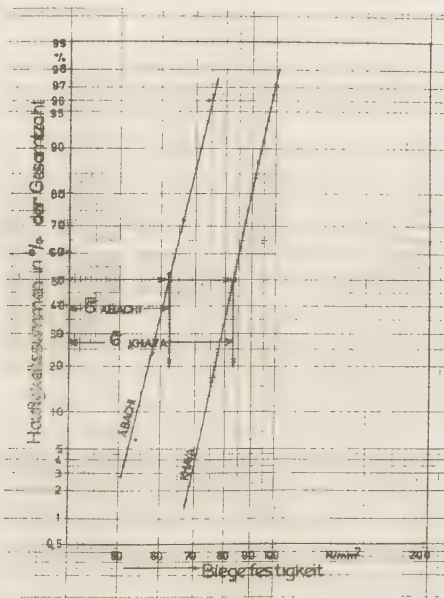


Bild 53a: Wahrscheinlichkeitsnetz zur Prüfung auf Normalverteilung

8.8.3. Korrelation zwischen Rohdichte ρ und Druckfestigkeit σ_D sowie zwischen Zugfestigkeit σ_z und Zug-E-Modul E_z

Unter der Annahme eines linearen Zusammenhanges wurden die in den Bildern 54 bis 56 dargestellten Regressionsgeraden ermittelt. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten r sind jeweils an die Geraden angeschrieben und sind ein Hinweis auf die Güte der linearen Korrelation, wobei noch die unter dem Winkel ψ verlaufenden Beziehungen eingetragen sind.

Sind also die Beziehungen

$$Y = b_1 + k_1 \cdot x \quad (27a)$$

$$X = b_2 + k_2 \cdot y \quad (27b)$$

gegeben, so ergibt sich aus der analytischen Geometrie der Winkel zwischen den beiden Geraden zu

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 \cdot k_2} \quad (28)$$

k_1 und k_2 = Richtungskoeffizienten der beiden Regressionsgeraden (BRONSTEIN-SEMEDJAJEW, 1965).

Für $\psi = 0^\circ$ folgt $r = 1$, d.h. eine vollkommene Korrelation; für $\psi = 90^\circ$ folgt $r = 0$, d.h. keine Korrelation.

Je kleiner ψ ist, desto besser die Korrelation. Statt der Berechnung von ψ , ist auch die Prüfung der Korrelationskoeffizienten r auf ihre Signifikanz gegen $\rightarrow 0$ mit Hilfe von statistischen Tabellen, z.B. aus SACHS (1973) möglich. Die Korrelationskoeffizienten r werden z.B. nach KREYSZIG (1975), Formel Nr. (106.6) errechnet.

Bei der Korrelation $\rho - \sigma_D$ wurden verschiedene Feuchtigkeitszustände untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 54 und 55 dargestellt. Wie man erkennt, ist die Korrelation für Abachi für den Darrzustand sowie für den Feuchtklimazustand gut, bei Khaya sinkt jedoch der Korrelationskoeffizient für den Darrzustand auf $r=0,239$ ab (Bild 55).

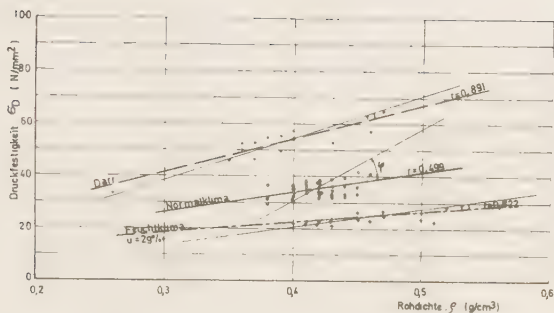


Bild 54: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte von Abachi für verschiedene Feuchtigkeitszustände

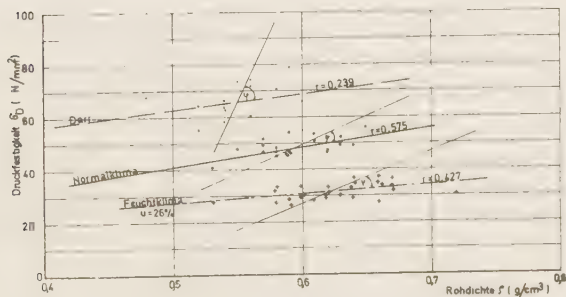


Bild 55: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte von Khaya für verschiedene Feuchtigkeitszustände

In Bild 56 ist die Korrelation $\sigma_Z - E_Z$ dargestellt.

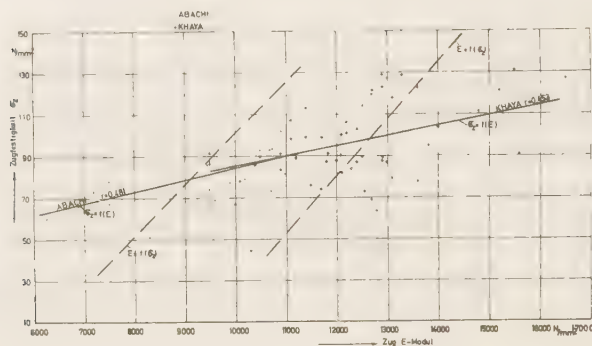


Bild 56: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Zug-E-Modul bei Normalklima

Man sieht, daß bei Khaya diese Korrelation schlechter ausfällt als die Korrelation $\rho - \sigma_D$, während bei Abachi kein nennenswerter Unterschied festzustellen ist.

8.8.4. Korrelation zwischen Biegefestigkeit σ_B und Biege-E-Modul E_B

Für die Korrelation $\sigma_B - E_B$, die wegen ihrer Verwendung in der maschinellen Holzsortierung besonders wichtig ist, wurde neben der linearen Berechnung nach Gleichung (27a) auch ein quadratischer Ansatz untersucht:

$$Y = b_1 + c_1 x + d_1 x^2 \quad (29)$$

Welche Beziehung eine bessere Korrelation liefert, wurde durch Vergleich der für beide Regressionsgleichungen berechneten Standardabweichungen der y -Werte für ein gegebenes x_1

$$s_y \cdot x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - y_i)^2}{n-2}} \quad (30)$$

entschieden (vgl. SACHS, 1973), wobei die entsprechenden Versuchswerte x_i , y_i eingesetzt werden müssen, also $y_i = b_1 + k_1 \cdot x_i$ usw..

Es ergab sich, daß $S_{y \cdot x}$ linear $<$ $S_{y \cdot x}$ quadratisch ist. Somit wird für die weitere Untersuchung die lineare Regression verwendet.

Die aus der Biegefestigkeitsprüfung erhaltenen einzelnen Wertepaare ($x = E$ -Modul, $y = \sigma_B$) wurden in ein Achsenkreuz eingezeichnet. Die Durchführung der Regressionsrechnung liefert die in Bild 57 eingetragenen Geraden, wobei einmal $\sigma_B = f(E)$ und sodann $E = f(\sigma_B)$ dargestellt wurde.

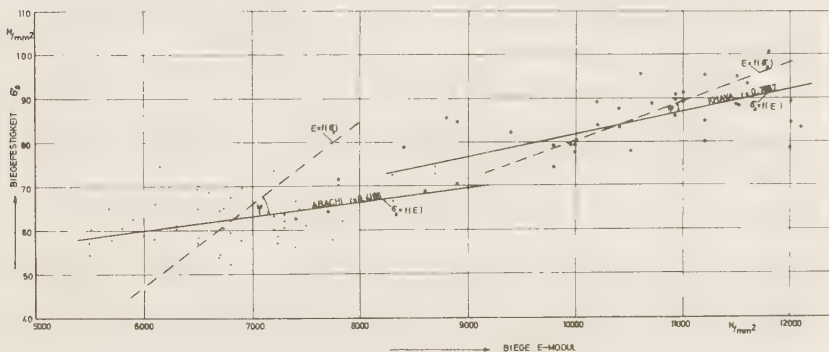


Bild 57: Regressionsgeraden und Korrelation zwischen Biegefestigkeit σ_B und Biege-E-Modul von Abachi und Khaya bei Normalklima

Aus der Biegefestigkeitsprüfung wurden noch folgende Werte ermittelt (vgl. Tabelle 26):

Tabelle 26: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Biegefestigkeitsprüfung von fehlerfreien Kleinproben

	Holzart	
	Abachi	Khaya
mittlere Biegefestigkeit $\bar{\sigma}_B = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{B_{\downarrow}} + \sigma_{B_{\uparrow}})$ =	63,0 N/mm ²	83,8 N/mm ²
Variationskoeffizient V_x =	8,8 %	9,2 %
Biege-E-Modul (Mittel aus E-Modul $E_{\downarrow}$ und E-Modul $E_{\uparrow}$) E_B =	6850 N/mm ²	10300 N/mm ²
Korrelationskoeffizient r =	0,417	0,767
gemeinsame Korrelationskoeffizienten für Abachi und Khaya r =	0,887	

Außer bei Abachi, bei dem die Korrelation $\sigma_B - E_B$ geringfügig schlechter war als die Korrelation $\rho - \sigma_B$ und $\sigma_Z - E_Z$ (Normal-klima) waren alle untersuchten Korrelationen schlechter als die Korrelation zwischen der Biegefestigkeit und dem Biege-E-Modul (Normalklima). Die hier erhaltenen Ergebnisse decken sich mit den Untersuchungen von FOSLIE und MOEN (1972), die norwegisches Fichtenholz untersucht haben. Ähnliche Ergebnisse hat auch CURRY (1969) erhalten.

Die hier durchgeführten Tests zur Prüfung der Korrelationskoeffizienten r auf ihre Signifikanz mit Hilfe statischer Tabellen nach SACHS (1973) ergaben für die Korrelation $\sigma_B - E_B$, daß die Korrelationen von Abachi mit $r = 0,4166$ bei 95 % und von Khaya mit $r = 0,767$ sogar bei 99 % Wahrscheinlichkeit auf ihre Signifikanz gesichert sind.

Zusammenfassend ergab die Korrelationsrechnung folgende in Tabelle 27 zusammengestellte Ergebnisse:

Tabelle 27: Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten r für die Beziehung zwischen den untersuchten Eigenschaftswerten bei verschiedenen Klimazuständen

Holzart		Zustand
Abachi	Khaya	
$\rho-r = 0,891-\sigma_D$	$\rho-r = 0,239-\sigma_D$	Darrzustand
$\rho-r = 0,499-\sigma_D$	$\rho-r = 0,575-\sigma_D$	Normalklima
$\rho-r = 0,822-\sigma_D$	$\rho-r = 0,427-\sigma_D$	Heiß-Feucht-Klima
$\sigma_Z-r = 0,481-E_Z$	$\sigma_Z-r = 0,453-E_Z$	Normalklima
$\sigma_B-r = 0,417-E_B$	$\sigma_B-r = 0,767-E_B$	Normalklima

8.8.5. Bestimmung der Bemessungsgeraden (Gerade der zulässigen Biegespannung)

Da die Biegefestigkeit σ_B eine der wichtigsten Eigenschaftswerte von Brettschichtträgern darstellt, wurde sie als mittelbares Sortierungsmerkmal über die unmittelbar gemessene Biegesteifigkeit $E_B \cdot I$ in die maschinelle Holzsortierung eingeführt. Hierzu muß die Korrelation $\sigma_B - E_B$ bekannt sein, wobei die Sortierungsergebnisse um so besser ausfallen, je besser die Korrelation $\sigma_B - E_B$ ist.

Die Anwendung der Korrelation $\sigma_B - E_B$ ist für die meist astfreien tropischen Hölzer berechtigt, denn hier entstehen keine durch Äste geschwächte Fehlstellen, die sonst die Beurteilung der Lamellen mit der nach dem Prinzip der Biegesteifigkeit arbeitenden Sortiermaschine fraglich machen würde. Eventuell muß an einem Ende der Sortiermaschine ein Sortierer stehen, der astbehaftete Lamellen jeweils aussortiert, bevor sie in die Maschine eingeführt werden. Andernfalls müssen die neu entwickelten Maschinen, die nach dem Resonanz- bzw. Ultraschallverfahren sowie nach der Durchstrahlungsmethode arbeiten, eingesetzt werden (vgl. PASCHALIS, 1978, HENKEL, M, 1972, KELLER, R., 1971).

Wird eine maximale wirtschaftliche Ausnutzung des gesamten Baumstammes für die Baukonstruktion angestrebt, so muß man auch die kronennahen Baumteile, die meist mit Ästen behaftet sind, in die Brettschichtholzerstellung einbeziehen. In Ghana wird bislang dieser Baumteil vorwiegend zur Holzkohleherstellung verwendet; weiter wird auch geplant, diesen Teil für die Herstellung von Pulp und Papier zu verwenden. Wird nun vermehrt dieses astreiche Holz für Baukonstruktionen bzw. Brettschichtträger verwendet, so muß dafür ein gewisser Abminderungsfaktor für $\sigma_{\perp}$ berücksichtigt werden.

Für die hier vorhandenen Abachi- und Khayahölzer stellt sich nun die Frage, ob die beiden Regressionsgeraden Y_A und Y_K (Y_A = Regressionsgerade von Abachi, Y_K = Regressionsgerade von Khaya) durch eine gemeinsame Regressionsgerade Y_{AK} ersetzt werden können. Dies wird durch die Tatsache nahegelegt, daß der gemeinsame Korrelationskoeffizient $r = 0,887$ (vgl. Tabelle 26) wegen der größeren Variationsbreite des E-Moduls besser ist als der der einzelnen Holzarten. Außerdem war $r = 0,887$ bei 99 % Wahrscheinlichkeit hoch signifikant. Mit einer gemeinsamen Regressionsgeraden würde erreicht, daß man beide Holzarten sowie weitere Holzarten von ähnlichen Festigkeitseigenschaften gemeinsam in die Sortiermaschine einlaufen lassen und somit sehr

rationell arbeiten könnte. Damit würde vermieden, daß für jede der über 300 verschiedenen ghanesischen Holzarten die Maschine umgestellt werden muß.

Da eine Korrelation $\sigma_B - E_B$ besteht, ist es zur Ableitung einer sogenannten Bemessungsgeraden für eine differenzierte Bestimmung der zulässigen Biegespannung nur erforderlich, die beiden in Tabelle 23 angegebenen zulässigen Biegespannungen durch eine Gerade zu verbinden.

Es ist jedoch bei maschineller Holzsortierung eine zuverlässigere Klassifizierung der Hölzer gegeben als bei visueller Beurteilung. Zwar kann angenommen werden, daß der Stand der Technik beim Vorhandensein einer maschinellen Sortieranlage besser geworden ist als bei der Festlegung des Sicherheitsfaktors V_3 in Abschnitt 8.5 angenommen, jedoch muß noch die Tatsache berücksichtigt werden, daß z.B. eine nach europäischen Verhältnissen fachmännische Ausführung der Verleimungsarbeiten, die Probleme bei der Lagerung der Leime unter den heiß-feuchten tropischen Bedingungen, das Fehlen von Berechnungsgrundlagen, die ordnungsgemäße Überwachung des Bauwerkes usw. erhebliche Schwierigkeiten bereiten werden.

Somit soll der Faktor $V_3 = 1,3$, welcher für europäische Verhältnisse angenommen wird, für tropische Länder um 20 % erhöht werden, so daß

$$V_3 = 1,30 \cdot 1,2 = 1,56 \quad \text{somit}$$

$$V = 1,25 \cdot 1,2 \cdot 1,56 = 2,34$$

wird.

Die $k/\sqrt{}$ -Werte nach Tabelle 22 ergeben sich damit für Biegung zu $k/\sqrt{}$ = 0,128 für Abachi und zu $k/\sqrt{}$ = 0,129 für Khaya.

Die zulässigen Biegespannungen ergeben sich also zu

$$\underline{\text{zul } \sigma_B} = 0,128 \cdot 63,0 \approx 8 \text{ N/mm}^2 \quad \underline{\text{für Abachi}} \quad \text{und}$$

$$\underline{\text{zul } \sigma_B} = 0,129 \cdot 83,8 \approx 11 \text{ N/mm}^2 \quad \underline{\text{für Khaya.}}$$

Diesen Werten sind die Biege-E-Moduli von $E_B = 6740 \text{ N/mm}^2$ und $E_B = 10500 \text{ N/mm}^2$ zugeordnet, wie Bild 58 zu entnehmen ist. Die durch diese beiden Punkte gehende Bemessungsgerade bzw. Gerade der zulässigen Biegespannung hat somit für astfreies Holz endgültig die Form

$$\text{zul } \sigma_B = 2,62 + 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot E_B \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (31a)$$

E_B ist hierbei in N/mm^2 einzusetzen.

Zur Ermittlung von zulässigen Biegespannungen für ästebehaftete Hölzer wird folgendermaßen vorgegangen:

An Hand von fehlerfreien Kleinproben aus Buche und von den in Kapitel 7 untersuchten Brettschichtträgern aus Buche ergab sich bei der pauschalen Ermittlung der zulässigen Biegespannung (vgl. Abschnitt 8.6.1) mit $k_{ut} = 1$, d.h. bei normalen Bedingungen (20°C und 65 % rLF) sowie mit $V_3 = 1,3$ für europäische Verhältnisse

$$k_{\text{Biegung}} = 0,30 \text{ für Buche}$$

Mit $V = 2,73$ (s. Abschnitt 8.5.) ergibt sich damit für fehlerfreies Buchenholz

$$\text{Zul } \sigma_B = \frac{k}{V} \cdot \sigma_B = 16 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Ein Vergleich mit DIN 1052, Blatt 1, Tabelle 6, zeigt daß die dort angegebene zulässige Biegespannung für Buche mittlerer Güte, die etwa der Güteklasse II für Nadelhölzer gleichgesetzt werden kann, nur etwa 70 % dieses Wertes beträgt. Es kann angenommen werden, daß diese Abminderung von $\text{Zul } \sigma_B$ überwiegend auf den Einfluß von Ästen zurückzuführen ist. Es wird daher vorgeschlagen, bei Verwendung von ästebehafteten tropischen Hölzern die zulässige Biegespannung mit 70 % des Wertes nach Gl. (31a) festzulegen. Damit folgt

$$\text{Zul } \sigma_B = 1,83 + 0,56 \cdot 10^{-3} \cdot E_B \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (31b)$$

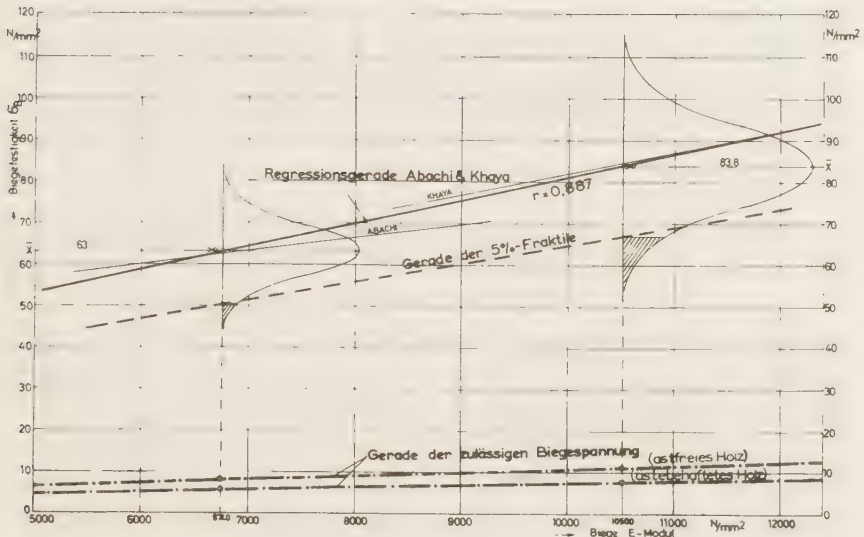


Bild 58: Gemeinsame Regressionsgerade für Abachi und Khaya und Bestimmung der Geraden der zulässigen Biegespannung (Bemessungsgeraden) von tropischen Hölzern am Beispiel von Abachi und Khaya bei maschineller Holzsortierung

Bei Anwendung dieser Gleichung sind Äste und Astansammlungen auf die in DIN 4074, Blatt 1 für Güteklasse II festgelegten Grenzwerte zu beschränken. Die für ästebehaftete Hölzer geltende Bemessungsgerade (31 b) ist ebenfalls in Bild 58 eingetragen.

Kann also der Biege-E-Modul von Abachi und Khaya mittels einer Sortiermaschine bestimmt werden, so ist mit Gleichung (31 a) die zulässige Biegespannung astfreier Abachi- und Khayahölzer und mit Gleichung (31 b) näherungsweise die zulässige Biegespannung ästebehafteter Abachi- und Khayahölzer gegeben. Solange für andere Holzarten die entsprechenden Zusammenhänge noch nicht bekannt sind, können die Gleichungen (31 a und 31 b) auch für diese Hölzer näherungsweise mit einem 20 %igen Abschlag benutzt werden.

Abschließend werden neben den hier untersuchten Holzarten Abachi und Khaya noch einige weitere tropische Holzarten (Tabelle 28) angegeben, welche entsprechend dem Vorschlag des GHANA FOREST PRODUCTS RESEARCH INSTITUTE (1969/70) im Bauwesen eingesetzt werden können. Die Werte für den Biege-E-Modul wurden dem Handbuch von FARMER (1972) entnommen.

Tabelle 28: Einige in Ghana vorkommende Holzarten, die für Bauzwecke geeignet sein sollen (vgl. GHANA FOREST PRODUCTS INSTITUTE, 1969 und 1970)

HOLZART			Biege-E-Modul bei $U \approx 12\%$ (N/mm^2)
Ghanesische Bezeichnung	in Deutschland be- kannte Bezeichnung (vgl. DIN 4076 Bl.1)	botanischer Name	
Kaku, Ekki	Bongosi, Azobe	<i>Lophira alata</i>	16900
Denya	Okan	<i>Cylicodisus gabunensis</i>	16100
Kusia, Opepe	Bilinga, Opepe	<i>Nauclea diderrichii</i>	13400
Afzelia	Afzelia	<i>Afzelia</i> spp.	13100
Dahoma	Dabema	<i>Piptadeniastrum africanum</i>	11700
Danta, Kotibe	Danta, Kotibe	<i>Nesogordonia papaverifera</i>	11700
Bonsamdua	Movingui	<i>Distemonanthus benthamianus</i>	11400
Dubini	Khaya	<i>Khaya ivorensis</i>	10350 ¹⁾
Baku	Makore	<i>Tieghemella heckelii</i>	10100
Nyankom	Niangon	<i>Tarrietia utilis</i>	9500
Odum	Kambala, Iroko	<i>Clorophora excelsa</i>	9400
Wawa	Abachi	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	6850 ¹⁾

1) Wert nach eigenen Untersuchungen (vgl. Tabelle 7)

9. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war, durch eingehende Untersuchungen Anhaltspunkte für den Einsatz einiger tropischer Hölzer im Bauwesen, besonders im Holzleimbau der Herkunftsländer, zu erhalten.

Ausgewählt wurden die beiden Holzarten Abachi (*Triplochiton scleroxylon*) und Khaya (*Khaya ivorensis*), während für die Holzverleimung Phenol-Resorcin-Harzleim (Kauresin) und Phenol-Formaldehyd-Harzleim (Kaurit) verwendet wurde.

Im einzelnen wurden folgende Untersuchungen bzw. Überlegungen durchgeführt:

- a) physikalische und mechanische Untersuchungen an fehlerfreien Kleinproben zur Ermittlung der wichtigsten Eigenschaftswerte der ausgewählten Hölzer;
- b) Prüfung der Bindefestigkeit der hergestellten Holz-Leim-Verbindungen an fehlerfreien Kleinproben. Dabei wurden die verschiedenen Witterungseinflüsse durch insgesamt 14 unterschiedliche Behandlungsarten simuliert, wobei bei dem extremen tropischen Heiß-Feucht-Klima besondere Aufmerksamkeit geschenkt wurde.
- c) Prüfung von verleimten Brettschichtträgern (Abmessungen: 6 cm x 12 cm x 210 cm) im Normal- bzw. Heiß-Feucht-Klima;
- d) Ableitung von pauschalen zulässigen Spannungen für astfreie und ästebehaftete tropische Hölzer am Beispiel der beiden Holzarten Abachi und Khaya;
- e) Vorschlag für ein Bemessungsverfahren sowie Ableitung von differenzierten zulässigen Spannungen mit Hilfe der maschinellen Holzsortierung auf Grund der Korrelation zwischen Biege-E-Modul und Biegefestigkeit,

Als Ergebnisse der Untersuchungen bzw. Überlegungen können festgehalten werden:

1. Verglichen mit anderen europäischen Konstruktionshölzern, ist Khaya ein mittelschweres, Abachi dagegen ein mäßig leichtes Holz.

Die Rohdichte in gedarrtem Zustand liegt bei Khaya mit $\rho_0 = 0,56 \text{ g/cm}^3$ in der gleichen Größenordnung wie bei echtem Mahagoni und Castanea, bei Abachi mit $\rho_0 = 0,38 \text{ g/cm}^3$ in der Größenordnung derjenigen von Strobe und Küstentanne.

2. Beide Holzarten quellen ziemlich schnell. Nach 3 Tagen Wasserlagerung nahmen Khaya um mehr als 60 % und Abachi um mehr als 80 % ihrer Ursprungsgewichte zu. Bei einem relativen Dampfdruck (Rel. Luftfeuchtigkeit) von etwa 100 %, bei 20°C, quillt Abachi insgesamt ca. zweimal so stark in tangentialer wie in radialer Richtung (6,77 : 3,22). Bei Khaya ist das Verhältnis 7,51 : 5,12.
3. Die Untersuchung der mechanischen Festigkeitseigenschaften ergab, daß Abachi kein festes Holz ist. Seine Festigkeiten liegen nahezu in der Größenordnung von Strobe und Küstentanne. Die mittlere Biegefestigkeit betrug 63 N/mm^2 , jedoch besitzt Abachi mit etwa 6800 N/mm^2 einen viel kleineren Biege-E-Modul als z.B. Strobe (9000 N/mm^2). Khaya dagegen ist festigkeitsmäßig mit echtem Mahagoni, Castanea oder Douglasie vergleichbar. Die mittlere Biegefestigkeit liegt hier bei 84 N/mm^2 , der Biege-E-modul bei 10300 N/mm^2 .
4. Unter normalen Klimabedingungen, d.h. bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit, lassen sich beide Holzarten gut mit Kauresin- und Kauritleim verleimen. Die erzielten Bindefestigkeiten der verleimten fehlerfreien Kleinproben können als ausreichend betrachtet werden. Sie betragen bei Kauresinverleimung bei Abachi etwa 6 N/mm^2 ,

bei Khaya etwa 11 N/mm^2 . Bei Kauritverleimungen ergeben sich geringere Werte.

5. Unter extremen Klimabedingungen, d.h. im Heiß-Feucht-Wechselklima ($20^\circ\text{C}/65\% \text{ rLF}$ ——— $40^\circ\text{C}/95\% \text{ rLF}$) wie es in den Tropen vorkommt, lassen sich ebenfalls noch brauchbare Leimverbindungen herstellen, wenn die Leimung der Proben im Normalklima ($20/65$) erfolgt. Allerdings fallen dann die Bindefestigkeiten von verleimten fehlerfreien Kleinproben bei Kauresin- und Kauritverleimung bei Abachi auf etwa $5/\text{Nmm}^2$, bei Khaya auf etwa 7 N/mm^2 ab. Insgesamt erweist sich die Khaya-Kauresin-Verleimung im tropenähnlichen Wechselklima als die günstigste Holz-Leim-Verbindung.
6. Die Verleimung tropischer Hölzer mit einem Feuchtigkeitsgehalt von ca. 30 %, was etwa dem Fasersättigungspunkt der untersuchten Hölzer entspricht, führte bei beiden Leimarten zu vollkommen unbefriedigenden Ergebnissen. Die zu verleimenden Lamellen dürfen deshalb in den Tropen vor dem Verleimen nicht dem dort herrschenden Extremklima ausgesetzt sein. Die Lamellen sind vielmehr vor dem Verleimen in einem Normalklima so zu lagern, daß sich ein Feuchtigkeitsgehalt von ca. 10 bis 15 % einstellt.
7. Eine 150-tägige Lagerung der Brettschichtträger nach der Verleimung in einem tropen-ähnlichen Heiß-Feuchtklima verringerte gegenüber Normalklima die Biegefestigkeit um bis zu 17 % bei Khaya und 24 % bei Abachi. Bei Buche, die als Vergleichsholz herangezogen wurde, war sogar eine Festigkeitsminderung von 39 % festzustellen.
8. Aufgrund von Sicherheitsüberlegungen und unter Berücksichtigung aller festigkeitsmindernden Einflüsse werden für astfreie Abachi- und Khayahölzer pauschale zulässige Spannungen bei tropischen Klimaverhältnissen abgeleitet:

	zul σ_B (Biegung) (N/mm ²)	zul τ_B (Schub infolge Biegung) (N/mm ²)	zul σ_D (Druck) (N/mm ²)	zul τ_Z (Zug) (N/mm ²)
Abachi	7	0,3	3	5
Khaya	9	0,4	4	7

9. Bei beiden Holzarten besteht eine gute Korrelation zwischen der Biegefestigkeit und dem Biege-E-Modul. Die zulässige Biegespannung in Abhängigkeit vom Biege-E-Modul ergibt sich daraus in Form einer Bemessungsgeraden für astfreie Hölzer zu

$$\text{zul } \sigma_B = 2,62 + 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot E_B \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

und für ästebehaftete Hölzer näherungsweise zu

$$\text{zul } \sigma_B = 1,83 + 0,56 \cdot 10^{-3} \cdot E_B \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Diese Beziehungen können zunächst näherungsweise auch für andere tropische Holzarten mit 20 %igem Abschlag benutzt werden.

Es ist zu hoffen, daß die erhaltenen Ergebnisse den Einsatz tropischer Hölzer im Bauwesen Ghanas künftig in verstärktem Maße fördern und dazu beitragen werden, den Ingenieurholzbau hier auf eine wissenschaftliche Grundlage zu stellen sowie die noch fehlende, jedoch dringend notwendige Normung von Grundsätzen für die Berechnung und Ausführung von Holzbauwerken in Angriff zu nehmen.

10. Literatur

- | | | |
|---|----------------|--|
| ANONYMUS | - | Stocking Information on the Supply of Wood resources in Ghana, Kumasi Tech. |
| ARBEITSGEMEINSCHAFT
HOLZ E.V. | 1958: | Holz auf der Weltausstellung Brüssel, Informationsdienst Holz, Ausgabe 2, Düsseldorf |
| ASSOCIATION COLONIES-
SCIENCES ET COMITE NA-
TIONAL DES BOIS COLO-
NIAUX | 1929/
1930: | Nos Bois Coloniaux (Côte d'Ivoire, Camerun, Gabon et Moyen Congo) Paris |
| BAUMANN R. | 1922: | Die bisherigen Ergebnisse der Holzprüfungen in der Materialprüfungsanstalt der T.H.Stuttgart, Heft 231, Stuttgart |
| BERGIN E.G. | 1953: | The Gluing Characteristics of various Eastern Candain wood species, Canadian Wood Worker |
| BOATENG E.A. | 1970: | A Geogrphy of Ghana, second edition, Cambridge Universität Press. Cambridge |
| BOHNY H. | 1970: | Zur Wirtschaftlichkeit von Holzkonstruktionen. Süddeutsche Zeitung, Nr. 133, S.5, München |
| BRETSCHAFT | 1977: | Das neue Sicherheitskonzept als Grundlage der Normung im Bauwesen: aus der Reihe Normungskunde Heft 10, 30 Jahre Normenausschuß Bauwesen |
| BRONSTEIN I.N.
SEMENDJAJEW K.A. | 1965: | Taschenbuch der Mathematik, Verl. Harry Deutsch, Zürich u.Frankfurt/1 |
| CASATI E. | 1932: | Essais Comparés sur éproveltes des dimensions differettes des quelques essences des bois, Zürich |
| CHUGG W.A.
JAMES P.E. | 1965: | The Gluability of Hardwoods for Structural Purposes. Research Report C/RR/22. Timber Research und Development Association, High Wycombe |

- CIZEK L. 1961: Statistische Auswertung von Versuchsergebnissen und ihre Auswirkung auf zulässige Spannungen für Holzbauten; Holz als Roh- u. Werkstoff, Bd. 19, S. 435-437
- CLINE Mc.G. 1912: Tests on Structural Timbers; Division of Forestry US. Dep. of Agriculture, Bulletin No. 108
- CURRY W.T. 1969: Mechanical Stress Grading of Timber Timberlab Papers No. 18, Forest Products Res. Lab, Princes Risborough
- CURRY W.T. 1970: Grade Stresses for Structural Laminated Timber; Ministry of Technology Forest Prod. Research Bulletin No. 53
- CURRY W.T. 1976: The relation between the modulus of Rupture (Ultimate bending stress) and modulus of elasticity of Timber Building Research Establishment CP 30/76, Princes Risborough
- DAHMS K.-G. 1968: Afrikanische Exporthölzer; DRW-Verlags-GmbH, Stuttgart
- DELMONTE P. 1947: The Technology of Adhesives; Reinhold Publishing Corp., New York
- DICKSON K. 1973: A new Geography of Ghana; Longman Group LTD.
BENNEH G.
- DIETZ A.G.H. 1946: A.S.M.E. 68.329
GRINSFELDER H.
REISSNER E.
- DUTKO P. 1969: Grundlagen des Holzleimbaues; Bau-Ingenieur-Praxis, Heft 51, Verl. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München
- EGNER K. 1958: Über die zweckmäßige Jahrringlage in brett-schichtverleimten Bauteilen; Der Zimmermeister, 61, Nr. 1
- EIKNER H.W. 1942: The Gluing characteristics of 15 species of Wood with cold-setting Urea-resin glues; Forest Products Laboratory, Madison 5, Report No. 1342, Wisconsin, USA
- ENDERSBY H.J. 1974: Stress Grading homegrown Softwoods BRE-Information IS/5/74, Princes Risborough

- | | | |
|------------------------------------|-----------------|--|
| FALCONER J.R.P. | 1972: | Design and Produktion of Tropical Timber Housing;
The Philippine Lumberman Vol.XVIII Nr.12 - Reprinted from Unasyilva Vol.25 (1) No.100 |
| FARMER R.H. | 1972: | Handbook of Hardwoods;
Dep.of the Enviroment Building Research Establishment, Princes Risborough |
| FENGEL D. | 1966,1967,1970: | Zit. von FENGEL D.u.GROSSER D.(1975 Chemische Zusammensetzung von Nadel u.Laubhölzern (Eine Literaturübersicht); Holz als Roh- und Werkstoff 33, S.32-34 |
| FOREST PRODUCTS RESEARCH INSTITUTE | 1969-70: | Information Bulletin No.1 Kumasi, Ghana UST/255/200/12/1969-70 |
| FOREST PRODUCTS LABORATORY | 1939: | Memorandum Standardisation of Timber Tests, Princes Risborough |
| FOSLIE M.
MOEN K. | 1972: | Norsk granvirkes Styrkeegenskaper (Strength properties of Norwegian Spruce) ; Meddelelse Nr.45, Norsk Tretekrisk Institut, Blindern |
| GHANA TIMBER MARKETING BOARD | 1969: | Ghana Hardwoods, Takoradi, Ghana |
| GOTTWALD H. | 1958: | Handelshölzer, ihre Benennung, Bestimmung und Beschreibung;
Ferdinand Holzmann Verlag, Hamburg |
| GUNBENKO A.B. | 1957: | Herstellung von verleimten Holzkonstruktionen, Moskau-Leningrad |
| HALASZ R.v. | 1966: | Industrialisierung in der Bautechnik;
Werner Verlag, Düsseldorf
(Zit.nach Hansruedi Bohny in der Süddeutschen Zeitung Nr.133 v.4.6.7 S.5) |
| HENKEL M. | 1972: | Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit Röntgenstrahlen
Holztechnologie 13 (1972)
S.223 - 228 |
| HENRICI D. | 1976: | Spannungsoptische Untersuchung rechtwinklig ausgeklinkter sowie lochbelasteter Biegeträger;
Holz als Roh- und Werkstoff 34, S.91-100 |

- HETZER O. 1906: Gebogener Holzbauteil für vereinigte Dachpfosten und Sparren; Kaiserliches Patentamt, Patentschrift Nr. 197773
- HOYLE R.J. 1976: Klemgard Park Footbrige - a glued wood Truss Structure Forest Products Journal Vol.26 No.2 USA
- INFORMATIONSDIENST HOLZ - : Holzleimbau A 55
- INFORMATIONSDIENST HOLZ 1976: Merkblattreihe Holzarten, Blatt Nr. 39
- JOHNSON J.B. 1898: Progress in Timber Physics
NEELY S.T. US.Dept. of Agriculture, Circular No.18 Washington (Zit.v. SCHNEE-WEISS G.,1969)
- KELLER R. 1971: Ermittlung der mechanischen Eigenschaften und der Dichte von Holz mit Hilfe von Röntgenstrahlen; Holztechnologie 12 (1971) S.225 - 232
- KITAZAWA 1946: A Study of adhesion in the glue-lines of twentytwo woods of the United States. Technical Publication No.66 State College of Forestry, New York
- KNIGGE W. 1966: Grundriss der Forstbenutzung, Verlag Paul Parey, Hamburg - Berlin
SCHULZ H.
- KOLLMANN F. 1951: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 1.Band, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, J.F. Bergmann, München
- KOLLMANN F. 1955: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 2.Band, Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, J.F. Bergmann, München
- KOLLMANN F. 1958: Einrichtung zur praxisnahen und wissenschaftlich exakten Messung von Sorptionseigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen; Holz als Roh- und Werkstoff, Bd.16, S.117-122
SCHNEIDER A.
- KREYSIG E. 1975: Statistische Methoden und ihre Anwendungen; Verlag Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen
- KUFNER M. 1963: Über die Spannungsverteilung in hölzernen Zugstäben; Holz als Roh- und Werkstoff, Bd.21 S.300-305

- KUFNER M. 1977: Maschinelle Schnittholzsortierung und ihr möglicher Einfluß auf die Holzverwendung; Holz als Roh- und Werkstoff, Bd.35, S.173-178
- MADSEN B. 1975: Duration of Load Tests for dry Lumber subjected to shear; Forest Products Journal, Band 25, No.10, S.44-52
- MANSHARD W. 1961: Die geographischen Grundlagen der Wirtschaft Ghanas; Franz Steiner Verlag GmbH, Wiesbaden
- MÖHLER K. 1970: In "Betonkalender II" S.473, Bild 9; Verlag Wilhelm Ernst u.Sohn, Berlin, München, Düsseldorf
- MÖHLER K. 1976: Zur Berechnung von Brettschichtholz konstruktionen; Bauen mit Holz, Nr.3, S.104-108
- MONNIN M. 1919: Essais physiques, statistiques et dynamiques des Bois, Bull.Sect. Techn.L'Aeroant
- MÜLLER P.H. 1968: Mechanical Stress-Grading of Structural Timber in Europe, North America and Australia. Wood Science and Technology, Vol.2, S.43-72
- NAIRN P.
COX H.A.
JOHNSON D.R. 1957: A second Collection of Wood specimens; Tothhill Press Ltd. London
- NARAYANAMURTI D.
GUPTA R.C.
VERMA G.M. 1962: Influence of Extractives on the Setting of Adhesives; Holzforschung und Holzverwertung Nr. 14, S.85-88
- NOACK D. 1971: Tropische Hölzer in tragenden Bauwerken; Holz-Zentralblatt Nr. 55, Stuttgart
- OEEC 1956: Laminated Timber Project No.113 Organisation for European economic Corp. Paris
- OLSON W.Z. 1955: Gluing Characteristics of Chingua-pin, Tonoak, California laurel; Forest Products Lab. Rep.No.2030, Madison 5, Wisconsin
- PASCHALIS P. 1978: Bestimmung der Korrelation zwischen ausgewählten Festigkeitseigenschaften und Strukturmerkmalen von Holz mit Anwendung des Resonanz- und Ultraschallverfahrens

- PECHMANN H.v.
GRAESSLE E.
WUTZ A. 1964: Untersuchungen über Bläuepilze an Kiefernholz;
Forstw.CBL. 83 Jg (9/10), S.290-314
- PELLERIN R.F. 1976: Nondestructive evaluation of Wood and Woodproducts;
Proc. XVI IUFRO Congress Div. V, S.184-189
- PLATH E. 1951: Die Holzverleimung;
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart
- PORTFOLIO OF GHANA MAPS 1961: Printed and published by the Survey of Ghana, Accra
- RACKWITZ G. 1961: Taschenbücher für Holztechnik und Holzwirtschaft, Band 1, Praktische Mathematik
- RENDLE B.J. 1969: World Timbers Vol.1 Europe u.Africa
Ernest Benn Ltd.Univ.of Toronto Press, London
- SACHS L. 1973: Angewandte Statistik;
Springer-Verlag, Berlin,Heidelberg, New York
- SCHARKOW W.I.et al 1939 1948: Zit. aus FENGEL D. u.GROSSER D. (1975) Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubhölzern (Eine Literaturübersicht);
Holz als Roh- und Werkstoff, S.32-34
- SCHEIBER Ch. 1965: Tropenhölzer;
VEB Fachbuchverlag, Leipzig
- SCHNEIDER A. 1965: Bedeutung und Einfluß des Arbeitens im Luft-Vakuum auf die Sorptionserscheinungen (am Beispiel von Holz Vakuum-Technik, Heft 1, S.13-20
Rudolf A. Lang-Verlag, Esch/Taunus
- SCHNEEWEIS G. 1969: Der Einfluß der Abmessungen auf die Biegefestigkeit von Holzbalken;
Holz als Roh- und Werkstoff, Bd.27, S.23-29
- SCHULZ H. 1976: Ansprüche an Holz für Holzleimbau und Holzwerkstoffe;
Internationaler Verband forstlicher Forschungsanstalten XVI IUFRO Congress, Norway
- SELBO M.L.
ANGEL H.W. 1955: Performance of Laminated Preservative-treated railroad bridge stringers;
Forest Products Journal

- | | | |
|---|-------|--|
| SENFT J.F.
SUDDARTH S.K.
ANGGLETON H.D. | 1962: | A new approach to the stress Grading of Timber;
Forest Products Journal 12 (4)
S.183-186 |
| SMITH N.F. | 1955: | Adhesives in Glued-Laminated Timber Construction: Forest Products Journal, Canada |
| SOCIÉTÉ LAMÉCO | 1973: | Fabrication de Charpentes en Bois Lamellé-Collé;
Soc. Laméco, Abidjan |
| SUNLEY J.G. | 1964: | A report of Research on the machine Grading of Lumber in Britain;
Forest Products Journal Vol.14
S.155-158 |
| THUNELL B. | 1952: | Einwirkung der Bläue auf die Festigkeitseigenschaften der Kiefer;
Holz als Roh- und Werkstoff, Bd.10,
S.362-365 |
| TUOMI R.
BOHANNAN B. | 1971: | Timber Bridges go mood;
American Wood Preserves Institute |
| WAGENFÜHR R.
SCHEIBER Ch. | 1974: | Holzatlas;
VEB Fachbuchverlag, Leipzig |
| WOOD L.W.
TASKER M. | 1957: | Evaluation of the Factor of Safety in Structural Timbers;
Forest Products Laboratory Report No.2068, Madison, Wisconsin |

Lebenslauf

Augustus Gyan Addae-Mensah

geboren am 7.8.1937 in Axim/Ghana

Vater : Joseph Mensah, Schulrat der Methodisten-Schulen in Ghana

Mutter : Beatrice Mensah geb. Quarshie, Lehrerin

1943-1951: Volksschule - Anglican School, Axim
Methodist Boys School, Sekondi

1952-1956: Gymnasium - Mfantshipim Secondary School,
Cape Coast

1957-1961: Technischer Mitarbeiter - Material-Prüfungs-
amt der Technischen Universität Kumasi

1963 : Stipendium zum Studium des Bauingenieurwesens
Erlernung der deutschen Sprache in Duisburg
Praktikum - Firma Rey, Straßenbau, Frankfurt/M.
Firma Riede, Straßenbau, Kassel
Firma Richter, Hoch- u. Tiefbau,
Kassel

WS
1964/1965: Studium des Bauingenieurwesens an der Tech-
nischen Hochschule in München

1968 : Diplom-Vorprüfung für Bauingenieure an der
TH München, Oktober 1968

WS
1969/1970: Hilfsassistent am Institut für Grundbau und
Bodenmechanik an der TH München

1971 : Verehelichung mit Eunice G. Sangmuah

1972 : Abschluß der Diplom-Hauptprüfung für Bauin-
genieure an der Technischen Universität München

1973 : Ingenieur bei Firma Dyckerhoff und Widmann,
München bis März 1973

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut
für Baubetriebslehre, TU München, April bis
August

im SS 1977: Wissenschaftlicher Assistent (Verwalter) am Insti-
tut für Baubetriebslehre, TU München

1974 - 1978: Stipendiat der Regierung Ghanas im Institut für
Holzforschung der Universität München

